



A24/192-1

**Koronaschallberechnung,
Swissgrid 380-kV-Hochspannungsfreileitung Filisur – Sils**

Auftraggeber: Axpo Grid AG
Rafael Szillat
Parkstrasse 23
5400 Baden

Bearbeiter: Gunnar Andrae, FKH

1	Zusammenfassung	2
2	Ausgangslage	2
3	Berechnungsvorgaben	3
4	Berechnungsmethode und Vorgehensweise	3
5	Anforderungen der Lärmschutzverordnung	6
6	Berechnungsergebnisse	6
7	Beurteilung, Schlussfolgerung	9
	Literatur	10
	Anhang	11

Zürich, 22. November 2024

FACHKOMMISSION FÜR HOCHSPANNUNGSFRAGEN


Gunnar Andrae
Projektleiter


Dr. Reinhold Bräunlich
Projektleiter

1 Zusammenfassung

In Hinblick auf die Sanierung des 380-kV-Hochspannungsfreileitungsabschnitts Filisur - Sils wurden Berechnungen zur Prognose der zu erwartenden Koronaschallpegel an 17 relevanten Standorten von Gebäuden der Lärmempfindlichkeitsstufe II und III durchgeführt.

Die geplante Sanierung sieht dabei den Ersatz der gealterten 600 mm² Aldrey-Leiterseile in Doppelbündelanordnung durch neue Leiterseile gleicher Geometrie vor. Aus diesem Grund wurden in dieser Studie Berechnungen auf Grundlage der aktuellen Mastgeometrie bei einer maximalen Betriebsspannungen beider Systeme von 420 kV durchgeführt.

Unter Berücksichtigung der Niederschlagsdaten wurden die Bewertungspegel nach der Lärmschutzverordnung LSV [1] bestimmt. Die theoretische Berechnung nach der von EPRI publizierten Methode¹ [4] ergibt, dass die Lärmschutzverordnung nach Pegelkorrektur (vgl. Tabelle 2) und Gewichtung der Schallemissionen mit den Regendauern an den untersuchten Standorten eingehalten wird. Für die Überprüfung wurden die statistischen Niederschlagsdaten der letzten zehn Jahre berücksichtigt.

2 Ausgangslage

Die 380-kV-Leitung La Punt - Filisur - Sils verbindet das Engadin mit dem Rheintal. Die Leitung spielt eine bedeutende Rolle in der Versorgung des Mittellandes. Sie wurde in den Jahren 1964/1965 vom Eidgenössischen Starkstrominspektorat (ESTI) genehmigt und 1966/1968 durch die EGL erstellt und in Betrieb genommen. Die Leitung befindet sich, den Betriebsjahren entsprechend, in einem normalen Zustand. Trotzdem wird nach über 50 Betriebsjahren eine umfassende Sanierung angestrebt, speziell da der Vorfall am Albulapass (Winter 2018/2019) Schwachstellen zutage gefördert hat.

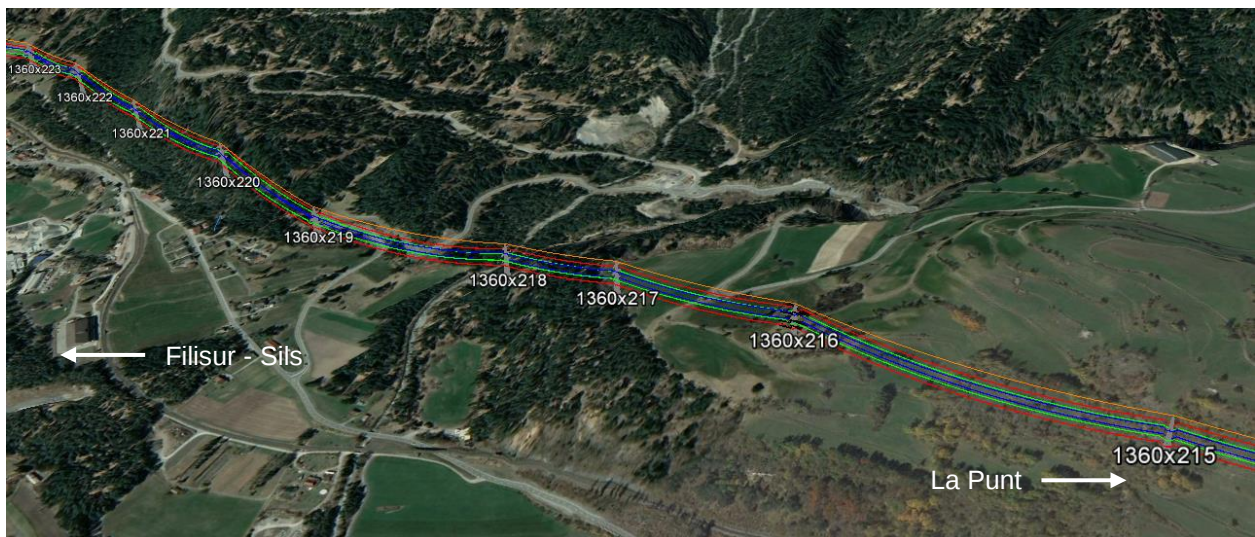


Abbildung 1 Ausschnitt des Trassenverlaufs der Hochspannungsfreileitung La Punt – Filisur – Sils (Albula-Leitung)

1 Die verwendete Methode hält sich an den Vorschlag der EPRI in der Ausgabe 3 des Transmission line reference book von 2005 und weicht damit von [5] ab, siehe Anhang

3 Berechnungsvorgaben

Die von Axpo AG vorgegebenen Mastbilder und Distanzen zu den lärmempfindlichen Orten sind im Anhang A1 dokumentiert. Neben dem geometrischen Leiterquerschnittsbild ist die lokale Höhe des untersten Leiterseils über Boden ein wichtiger Parameter, der die Schallpegel mitbestimmt. Dieser Wert ist zusammen mit dem rechtwinklig dazu kommenden Horizontalabstand zum Beurteilungsort (Abstand Leitungsachse - Gebäude) in den Ergebnissen (Tabelle 4) festgehalten. Die Auswertehöhe des Schalldruckpegels wurde am jeweiligen zu bewertenden Objekt am Ort der Dachkante mit kürzestem Abstand zum untersten Leiterseil festgelegt. Exemplarisch ist in Abbildung 2 ein Leiterseil mit Querschnitt 600 mm^2 , wie es für die Berechnungen berücksichtigt wurde, dargestellt.



Abbildung 2 Aldrey-Leiterseil mit Querschnitt 600 mm^2 und Durchmesser 31.9 mm

4 Berechnungsmethode und Vorgehensweise

Die nachfolgenden Absätze enthalten die wichtigsten Erläuterungen zu allen durchgeführten Berechnungen.

- 1) Die numerischen Berechnungen der Randfeldstärken, der Schalleistungspegel sowie der Schalldruckpegel wurden mit dem FKH-Programm „EBL“ durchgeführt.
- 2) Die Berechnungen wurden nach der Methode der EPRI [4] und der CIGRE' durchgeführt. Es wurden die Koronaschalldruckpegel gewichtet mit der Bewertungsfilterkurve A [2] gemäß Gehörempfindlichkeit (Einheit dB(A)) für ein Querprofil auf Höhe Dachkante über Boden für die maximale Betriebsspannung von 420 kV bestimmt. Eine quantitative Bestimmung schmalbandiger, tonaler Schallanteile, welche unter bestimmten Witterungsbedingungen aus dem Koronarauschen herauszuhören sind, wurde nicht vorgenommen. Der tonale Anteil wurde aber pauschal berücksichtigt (siehe Punkt 7).
- 3) Dabei wurde eine Schallabsorption der Luft von 0.02 dB(A)/m berücksichtigt (gilt angenähert für eine Luftfeuchtigkeit f_r : 70 % und eine Lufttemperatur T : $15 \text{ }^\circ\text{C}$).
- 4) Unter Berücksichtigung der Lärmphasen und der Zuschläge und Abzüge wurde der Beurteilungspegel für die dreißig vorgegebenen Orte für die neu projektierten Mast-situationen bestimmt.
- 5) Als Regenrate für die Lärmphase „Regen“ wurde aus der Regenstatistik der Meteo Schweiz ein mittlerer Wert von 1.5 mm/h ermittelt und für die Lärmphasen mit Niederschlag herangezogen. Bei der Lärmphase „Nebel“ wurde als Regenrate ein mittlerer Wert von 0.3 mm/h herangezogen. Die Lärmphase „trocken“ kann aufgrund ihres kleinen Einflusses vernachlässigt werden.

- 6) Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Bewertungspegel unter Berücksichtigung der Lärm-Art und der zeitlichen Lärmphasen ist im Anhang 6 der LSV: „Belastungsgrenzwerte für Industrie- und Gewerbelärm“ beschrieben: Für „Anlagen der Industrie, des Gewerbes und der Landwirtschaft“ (Ziff. a) ist ein Zuschlag von 5 dB(A) und bei hörbarem Gehalt an tonalem Schall ein Zuschlag von 2-6 dB(A) zum ermittelten Schallpegel hinzuzurechnen. Aufgrund der nur zeitweise wahrnehmbaren Tonalität wurde für diese Studie ein Pegelzuschlag von 4 dB(A) angewendet. Für die Ermittlung der jahresdurchschnittlichen Beurteilungspegel wurden die Messwerte der Wetterstatistik von 2015 bis 2024 an zwei Wettermessstationen (Meteo Schweiz) nahe der Hochspannungsleitung La Punt - Filisur - Sils zu Grunde gelegt. An den Messstationen Berguen-Latsch und Samedan wurden hierfür die Stundenwerte für Regen und Nebel (rel. L. > 98%) bei Tag und Nacht ausgewertet [11]. Die Zeitkorrekturen wurden gemäß der gemittelten Niederschlagsphasen über die Jahre 2015 bis 2024 vorgenommen.
- 7) Die projektierten Leiterseile sind als neu angenommen. Somit kommen keine Abzüge für gealterte Leiterseile zum Tragen.

Ermittlung des Beurteilungspegels

Der Beurteilungspegel L_r für Industrie- und Gewerbelärm und ähnliche Lärmarten wird, getrennt für Tag (07 bis 19 Uhr) und Nacht (19 bis 07 Uhr), aus den Teilbeurteilungspegeln $L_{r,i}$ der einzelnen Lärmphasen wie folgt berechnet:

$$L_{r,i} = 10 \cdot \log \sum_i 10^{0,1 \cdot L_{r,i}}$$

Der Teilbeurteilungspegel $L_{r,i}$ wird für die durchschnittliche tägliche Dauer der Lärmphase i wie folgt berechnet:

$$L_{r,i} = L_{eq,i} + K_1 + K_2 + K_3 + 10 \cdot \log(t_i/t_0)$$

$L_{eq,i}$	A-bewerteter Mittelungspegel während Lärmphase (berechneter Wert)
K_1	Pegelkorrektur für Industrie- und Gewerbelärm
K_2	Pegelkorrektur für Tongehalt (vorherrschende Frequenzen, etc.)
K_3	Pegelkorrektur für Impulsgehalt (Schläge, Hämmern, etc.)
t_i	Durchschnittliche tägliche Dauer der Lärmphase in Minuten
t_0	720 Minuten (= 12 x 60 min)

Die entsprechenden Pegelkorrekturen K_1 bis K_3 sind in Tabelle 2 aufgelistet. Es wurden zudem Abzüge für gealterte bzw. vorbehandelte neue Leiterseile berücksichtigt.

Tabelle 1 Aufstellung der Auswertung der Wetterdaten an zwei Standorten der Meteo Schweiz nahe der zu beurteilenden Hochspannungsleitung, welche für die zeitlichen Abzüge verwendet wurden. Es wurden die Regendaten der letzten 10 Jahre in der Auswertung berücksichtigt

Phase		Wetterstation Berguen-Latsch	Wetterstation Samedan	
	Regenrate	Anzahl Stunden	Anzahl Stunden	Mittelwert rel.
	mm/h	%	%	%
		Tag		
Niederschlag	>1.5	2.0	2.1	2.1
Nebel	>0.3	5.8	5.1	5.5
		Nacht		
Niederschlag	>1.5	2.0	2.2	2.1
Nebel	>0.3	6.8	5.8	6.3

Tabelle 2 Übersicht der Zuschläge für die Lärm-Art nach LSV (Total Stunden Tag bzw. Nacht pro Jahr: 4380 h)

	Tag		Nacht	
Wettersituation	Niederschlag	Nebel	Niederschlag	Nebel
Regenrate für die Berechnung des Schalldruckpegels der Lärmphase [mm/h]	1.5	0.3	1.5	0.3
Zuschlag Industrie und Gewerbelärm, Ziff. a) [dB(A)]	5	5	5	5
Zuschlag Tongehalt [dB(A)]	4	0	4	0

5 Anforderungen der Lärmschutzverordnung

Tabelle 3 enthält die Belastungsgrenzwerte der Lärmschutzverordnung (LSV) [1] für Industrie und Gewerbelärm, die bei Koronaschallemissionen zu berücksichtigen sind. Für das Erneuerungsprojekt der Freileitung sind die Planungswerte je nach Empfindlichkeitsstufe der belasteten Orte unterschiedlich festgelegt (Art 43 der LSV):

Tabelle 3 Belastungsgrenzwerte für Industrie- und Gewerbelärm (LSV [1], Anhang 6)

Empfindlichkeitsstufe (Art. 43)	Planungswert Lr in dB(A)		Immissionsgrenzwert Lr in dB(A)		Alarmwert Lr in dB(A)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Empfindlichkeitsstufen:

- I Zonen mit einem erhöhten Lärmschutzbedürfnis, namentlich in Erholungszonen;
- II Zonen, in denen keine störenden Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohnzonen sowie Zonen für öffentliche Bauten und Anlagen;
- III Zonen, in denen mäßig störende Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohn- und Gewerbe-zonen (Mischzonen) sowie Landwirtschaftszonen;
- IV Zonen, in denen stark störende Betriebe zugelassen sind, namentlich in Industriezonen.

Gemäß Kundenangaben liegen die nächstgelegenen lärmempfindlichen Empfänger-Liegenschaften im betroffenen Siedlungsgebiet in Zonen der Empfindlichkeitsstufe (ES) II und Empfindlichkeitsstufe (ES) III.

6 Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse wurden in Form von Koronaschalldruckpegeln in Tabelle 4 für die projektierten Mastbilder zusammengestellt. Die Querprofil-Graphik des für Regen berechneten Bewertungspegels aufgrund der mittleren Regendauern für Nacht auf Höhe des lärmempfindlichen Ortes 1 ist im Anschluss an die genannte Tabelle dargestellt. Die übrigen Objekte und deren Querprofile sind im Anhang zu finden.

Alle zu den 17 betrachteten Objekten gehörenden Profile sind für eine maximalen Betriebsspannung von 420 kV in einem Korridor von 100 m beidseits der Leitung ausgewertet und mit den erforderlichen Zu- bzw. Abzügen beaufschlagt worden (vgl. Tabelle 1 und

Tabelle 2).

Die Bewertungspegel sind mit dem Planungswert der LSV zu vergleichen (Tabelle 3). An den zu untersuchenden Objekten wird der Planungswert für die Empfindlichkeitsstufe II von 45 dB(A) und III von 50 dB(A) bei Nacht, gemäß der Berechnungen für die Maximalspannung von 420 kV eingehalten. Die Abstände der untersten Leiterseile über Boden wurden auf Grundlage einer Leitertemperatur von 80°C und dem sich daraus ergebenden Durchhang bestimmt. Der Beurteilungspegel wurde an jedem untersuchten Objekt an der dem untersten Leiterseil nächste Stelle des Objektes ausgewertet, vgl. das Beispiel in Abbildung 3.

Tabelle 4 Zusammenstellung der berechneten Beurteilungspegel für den Korona-Schalldruck an den Orten mit Lärmempfindlichkeit für die projektierten Mastbilder. Die Beurteilungspegel wurden gemäß LSV und Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 ermittelt (Zuschlag für Industrieanlagen und Schall-Tonalität sowie Zeitkorrektur, siehe Text). Alle Pegelwerte wurden bei der maximalen Betriebsspannung von 420 kV bestimmt und am Ort der Gebäude angegeben (vgl. Abbildung 3)

Situation	Situationskennzeichnung nach AXPO	Lärmempfindlicher Ort	Mast Bild beim lärmempfindlichen Ort	Entfernung des Gebäudes zur Leitungssachse	Höhe der untersten Leiterseile im Bereich des lärmempfindlichen Ortes über Boden	Einzuhaltender Planungswert PW (Nacht)	Berechneter Beurteilungspegel bei Tag	Berechneter Beurteilungspegel bei Nacht
				[m]	[m]	[m]	[dB(A)]	[dB(A)]
1	13	Camping Islas 7477 Bergün Filisur	1360-206 1360-207	8.5	20.8	45 dB (Empf. Stufe II)	43.0	43.0
2	14	Camping Islas 7477 Bergün Filisur	1360-206 1360-207	23.7	19.1	45 dB (Empf. Stufe II)	42.3	42.3
3	15	Camping Islas 7477 Bergün Filisur	1360-206 1360-207	51.4	14.7	45 dB (Empf. Stufe II)	40.1	40.2
4	16	Farsox 1 7473 Albula/Alvra	1360-209 1360-210	25.3	24.1	50 dB (Empf. Stufe III)	41.5	41.5
5	17	Farsox 1 7473 Albula/Alvra	1360-209 1360-210	40.1	21.8	50 dB (Empf. Stufe III)	40.5	40.6
6	18	Badnerstrasse 48.1 7492 Albula/Alvra	1360-212 1360-213	51.3	-0.7	50 dB (Empf. Stufe III)	40.4	40.4
7	19	Pro Pitschen 13 7472 Albula/Alvra	1360-219 1360-220	43.4	40.1	50 dB (Empf. Stufe III)	38.9	39.0
8	20	Pro Pitschen 13 7472 Albula/Alvra	1360-219 1360-220	60.1	46.4	50 dB (Empf. Stufe III)	37.7	37.7
9	21	Pro Pitschen 13 7472 Albula/Alvra	1360-219 1360-220	37.5	62.8	50 dB (Empf. Stufe III)	37.6	37.7
10	22	Albulastrasse 69 7472 Albula/Alvra	1360-220 1360-221	51.1	71.9	50 dB (Empf. Stufe III)	39.5	39.5
11	23	Cresta Tganoina 4.1 7084 Albula/Alvra	1360-226 1360-227	59.1	39.8	50 dB (Empf. Stufe III)	38.1	38.1
12	24	Spisagger 1.1 7084 Albula/Alvra	1360-229 1360-230	40.8	9.0	50 dB (Empf. Stufe III)	39.0	39.0
13	25	Spisagger 1 7084 Albula/Alvra	1360-229 1360-230	54.6	3.1	50 dB (Empf. Stufe III)	40.2	40.3
14	26	Valmala 13 7451 Albula/Alvra	1360-235 1360-236	57.6	4.6	50 dB (Empf. Stufe III)	39.7	39.7
15	27	Preda Purtgera 7082 Vaz/Obervaz	1360-248 1360-249	9.3	24.9	50 dB (Empf. Stufe III)	43.0	43.0
16	28	Prin 12.1 7412 Scharans	1360-253 1360-254	13.0	39.5	50 dB (Empf. Stufe III)	40.3	40.3
17	29	Prin 10 7412 Scharans	1360-253 1360-254	59.4	25.3	50 dB (Empf. Stufe III)	38.7	38.7

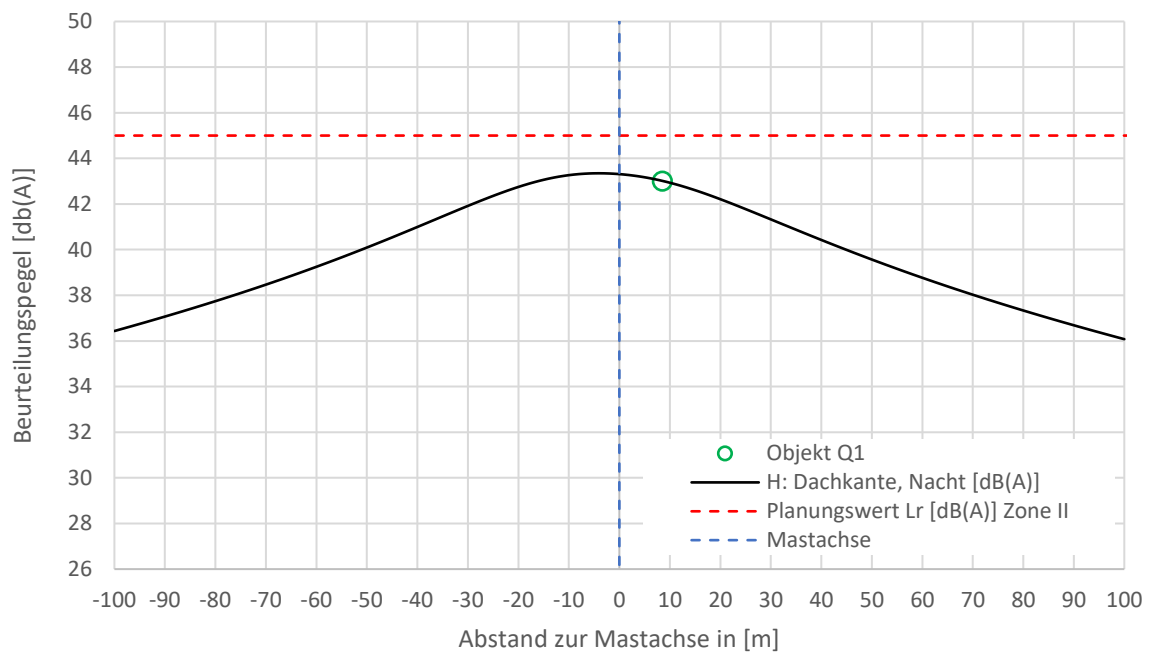


Abbildung 3 Querprofil der Beurteilungspegel bei Nacht für den A-bewerteten Koronaschalldruck auf Höhe der Dachkante über Erdboden für Leiteranordnung: Spannweite 1360x206 – 1360x207 mit eingezeichnetem Abstand der Mastachse zum lärmempfindlichen Ort 1: Camping Islas (Empfindlichkeitsstufe II) bei maximaler Betriebsspannung 420 kV für System 1 und System 2. Berechnungsmethode nach EPRI, Berücksichtigung Schallabsorption der Luft (α 70 %, T 15 °C)

7 Beurteilung, Schlussfolgerung

Aus dieser Studie geht hervor, dass die Lärmschutzbestimmungen an den 17 untersuchten lärmempfindlichen Orten nach der geplanten Sanierung eingehalten werden.

Für die Beurteilung wurden neben der Zeitkorrektur folgende Lärmkorrekturen vorgenommen: Zuschlag von 5 dB(A) für Lärm aus Industrie und Gewerbe nach Ziff. a) der Lärmschutzverordnung, sowie 4 dB(A) pauschaler Zuschlag für einen Reintongehalt bei starkem Regen und bei Schneefall um den Gefrierpunkt. Auf eine quantitative Abschätzung des tonalen Anteils im Koronaschall wurde verzichtet. Es wurde keine Pegelkorrektur zur Berücksichtigung einer Seilvorbehandlung zur Erreichung einer wirksamen Anfangs-Hydrophilie vorgenommen. Die Berechnung geht von mindestens teilealterten Seilen, bzw. von einer wirksamen Vorbehandlung der Leiterseile aus.

Die Schallemissionen treten in erster Linie in Phasen mit Niederschlag auf und in geringerem Masse bei Nebel bzw. bei nassen Leiterseilen. Bei Gewichtung der Schallemissionen mit den Regendauern aus den statistischen Niederschlagsdaten der letzten zehn Jahre wird an den untersuchten Orten der Planungswert von 45 dB(A) (Empfindlichkeitsstufe II) und 50 dB(A) (Empfindlichkeitsstufe III) in der Nacht eingehalten. Mit entsprechend grösserem Sicherheitsabstand sind auch die um 10 dB(A) höheren Planungspegel am Tag eingehalten.

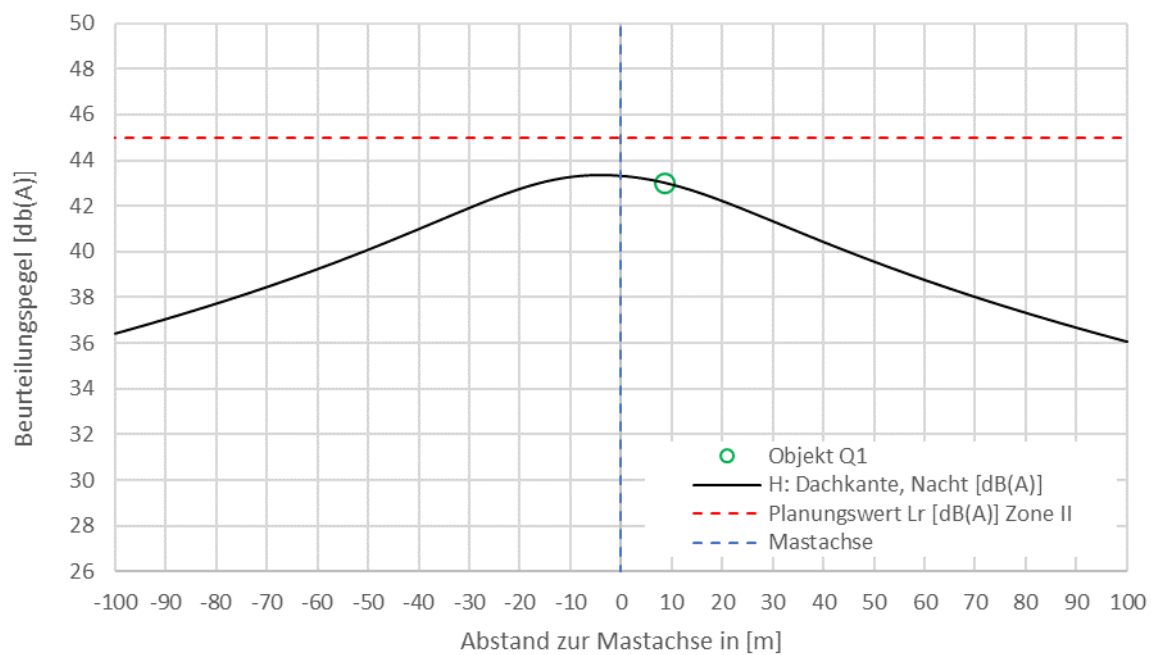
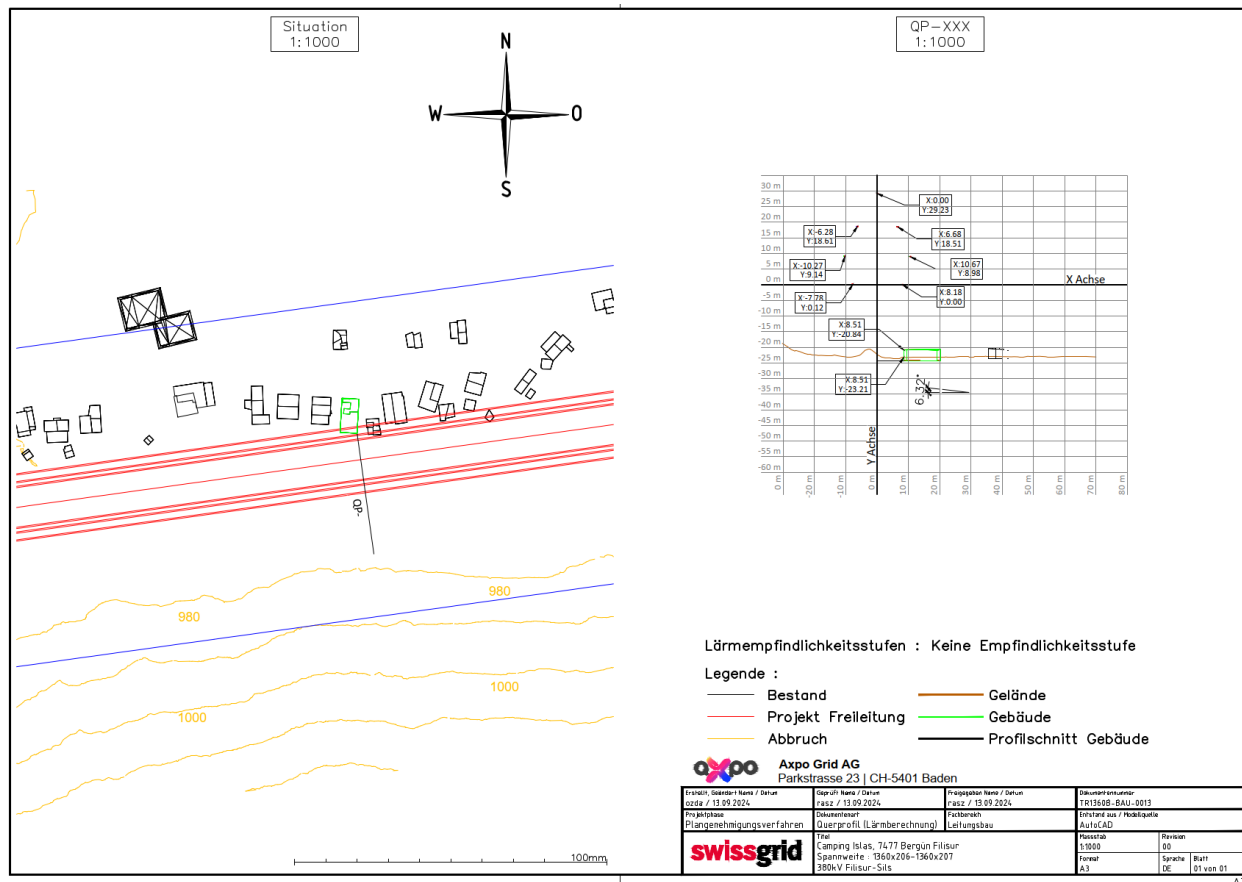
Die Berechnungsanleitung [5] ist zurzeit in Überarbeitung. Die vorgeschlagene Formulierung führt zu sehr geringen Abweichungen gegenüber den nach dieser neuen Wegleitung berechneten Werten [12]. Eine Vergleichsrechnung nach der neuen Methode zeigt keine Verletzung der genannten Grenzwerte.

Literatur

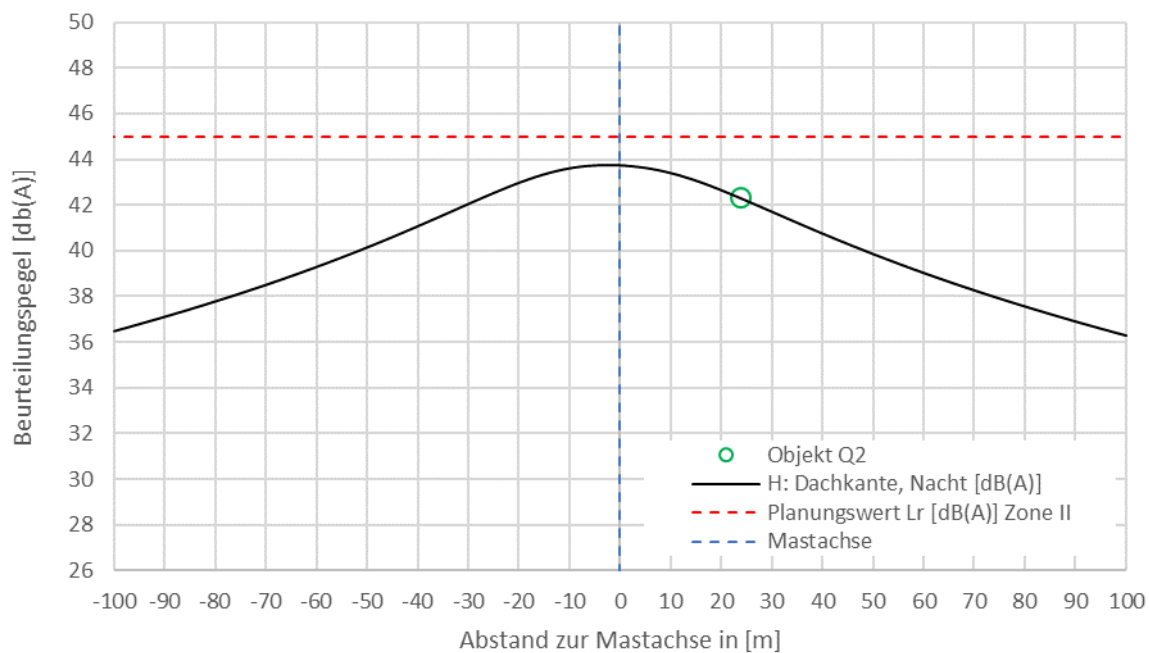
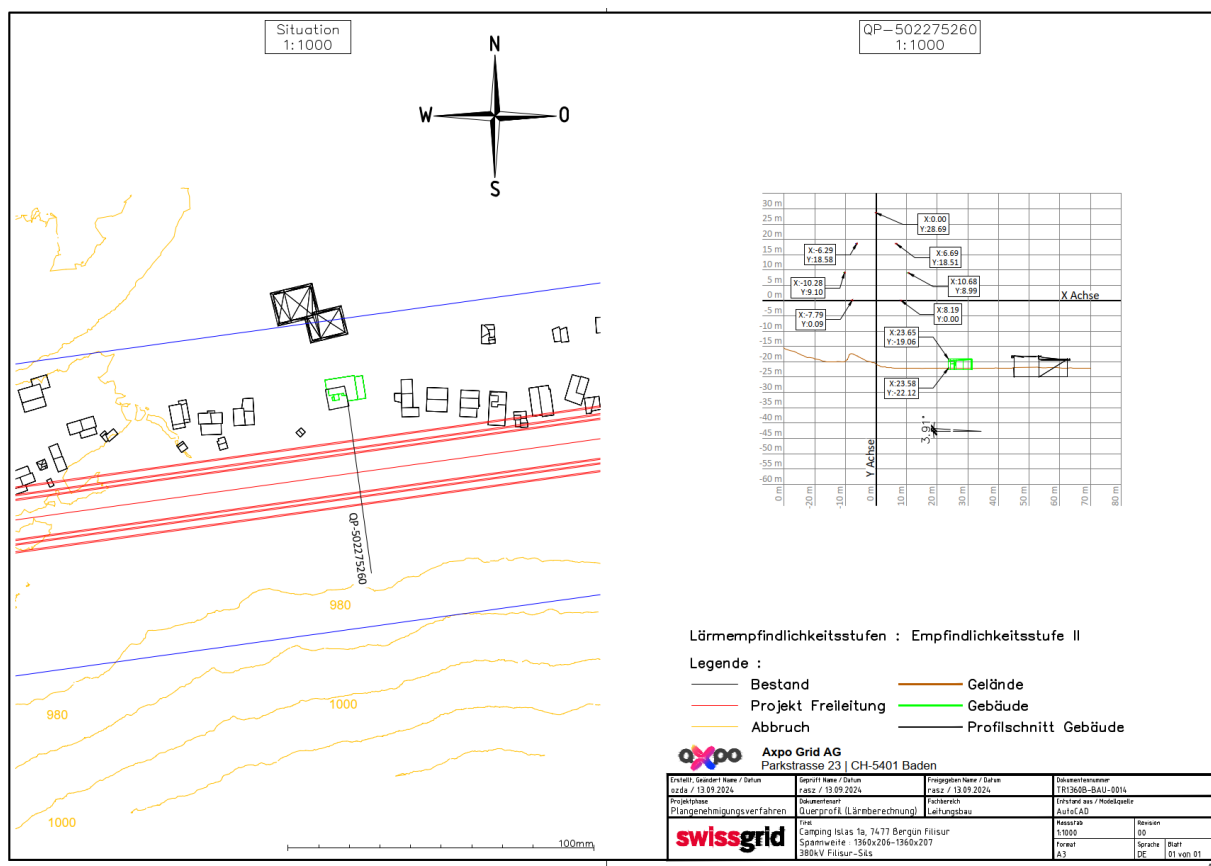
- [1] Lärmschutzverordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand: 1. August 2010) SR 814.41.
- [2] DIN EN IEC 61672-1 2003-10, Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen; (Bewertungsfilter-Kurven A und C)
- [3] H. Happoldt, D. Oeding,
"Elektrische Kraftwerke und Netze",
Springer Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1978.
- [4] "Transmission line reference book, 345 kV and above"; Electric Power Research Institute in Palo Alto, 2nd ed. 1982 and 3rd ed. 2005
- [5] Aufbereitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug – Update des Berichts: Empa-Nr. 452'574, vom 30. Mai 2016 (zu beziehen auf der Internetseite des BAFU)
- [6] C. Gary, M. Moreau;
"L'Effet de Couronne en Tension Alternative";
Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, 1976 (Complément, page 417ff).
- [7] A. Coquard, C. Gary;
"Audible Noise Produced by Electrical Power Transmission Lines of Very High Voltages";
CIGRE-Paper 36-02, Session 1972, Paris.
- [8] Cigré Working Group 36.01, „Addendum to Cigré Document No 20 (1974): Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems (Description of Phenomena and Practical Guide for Calculation)“, Cigré Document No 61, Paris, December 1996.
- [9] Vinh T., King J.V., "Statistical analysis of audible corona noise and loss for a 10-conductor UHV bundle"; IEEE, Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No1, January, 1987, pp217-224
- [10] Jauch Felix; "Applikation zur Berechnung der akustischen Geräuschemissionen von Hochspannungsleitungen"; Semesterarbeit, ETH, EEH Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Betreuer: Dr. Ulrich Straumann, Prof. Dr. Klaus Fröhlich, 14. Februar 2010.
- [11] Andrae G., „Niederschlag_01.01.2013-15.10.2023“, 10.2022
- [12] Bräunlich R., „Prognose von Koronaschallemissionen an Hochspannungsleitungen, Vorschlag für eine vereinfachte Berechnungsformulierung“, FKH Bericht A22/075, 2022

Anhang

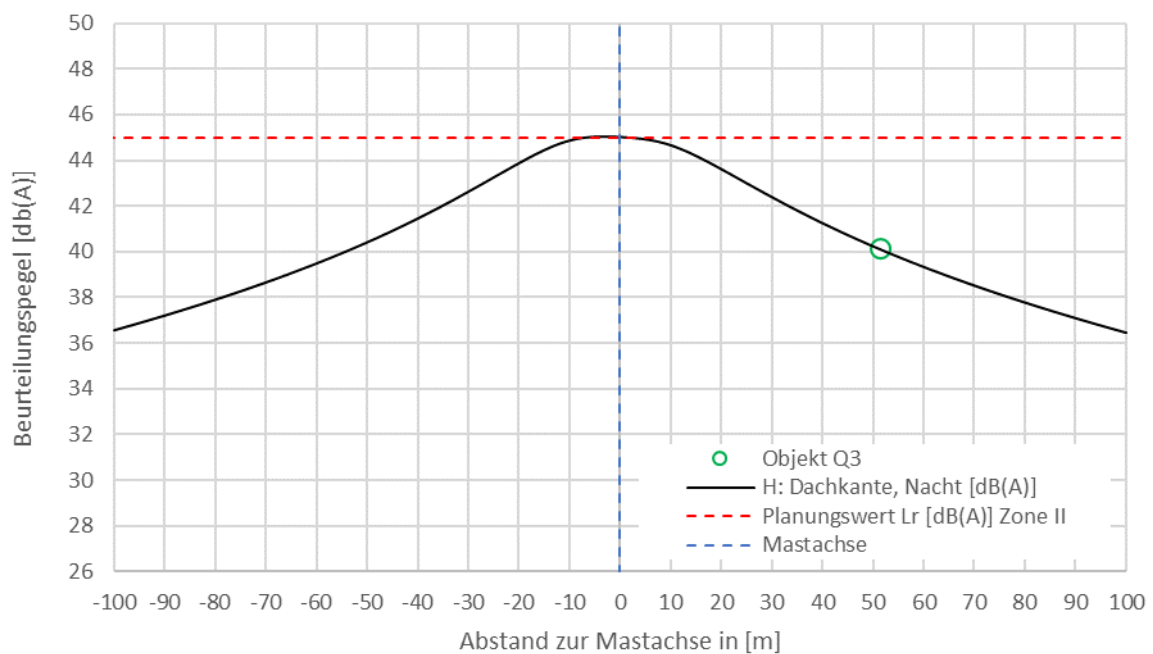
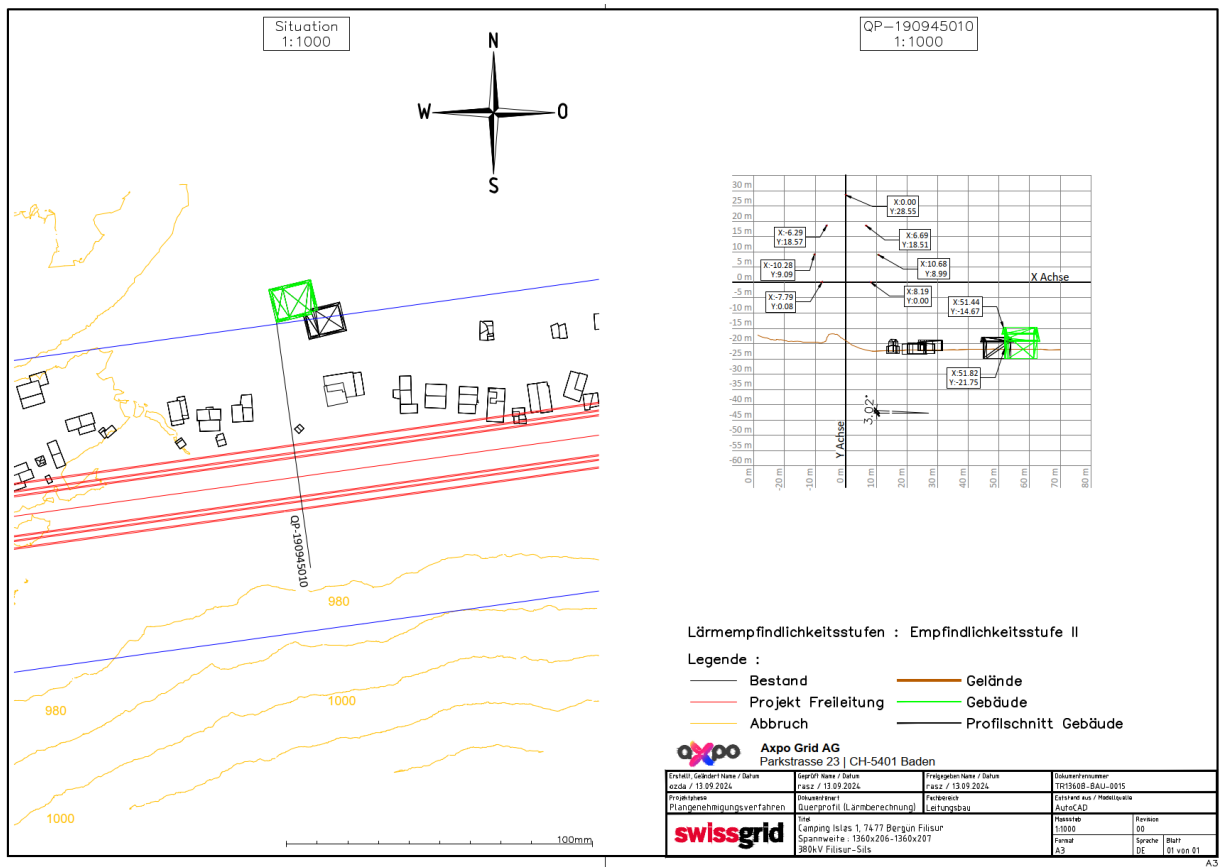
Lärmempfindlicher Ort 1



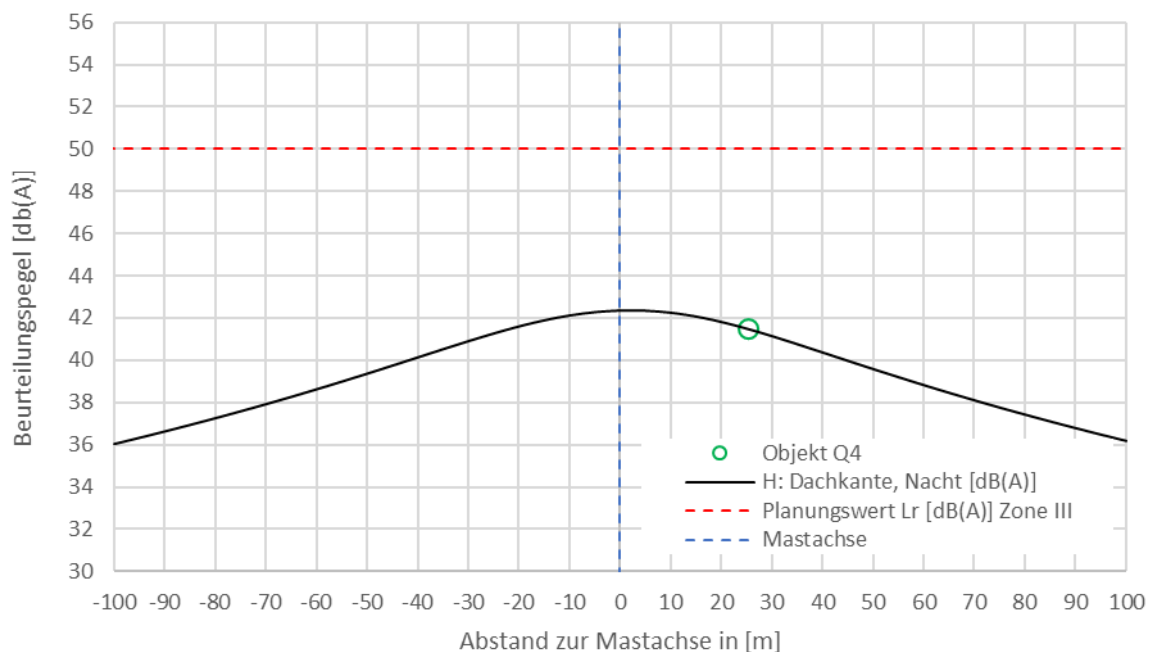
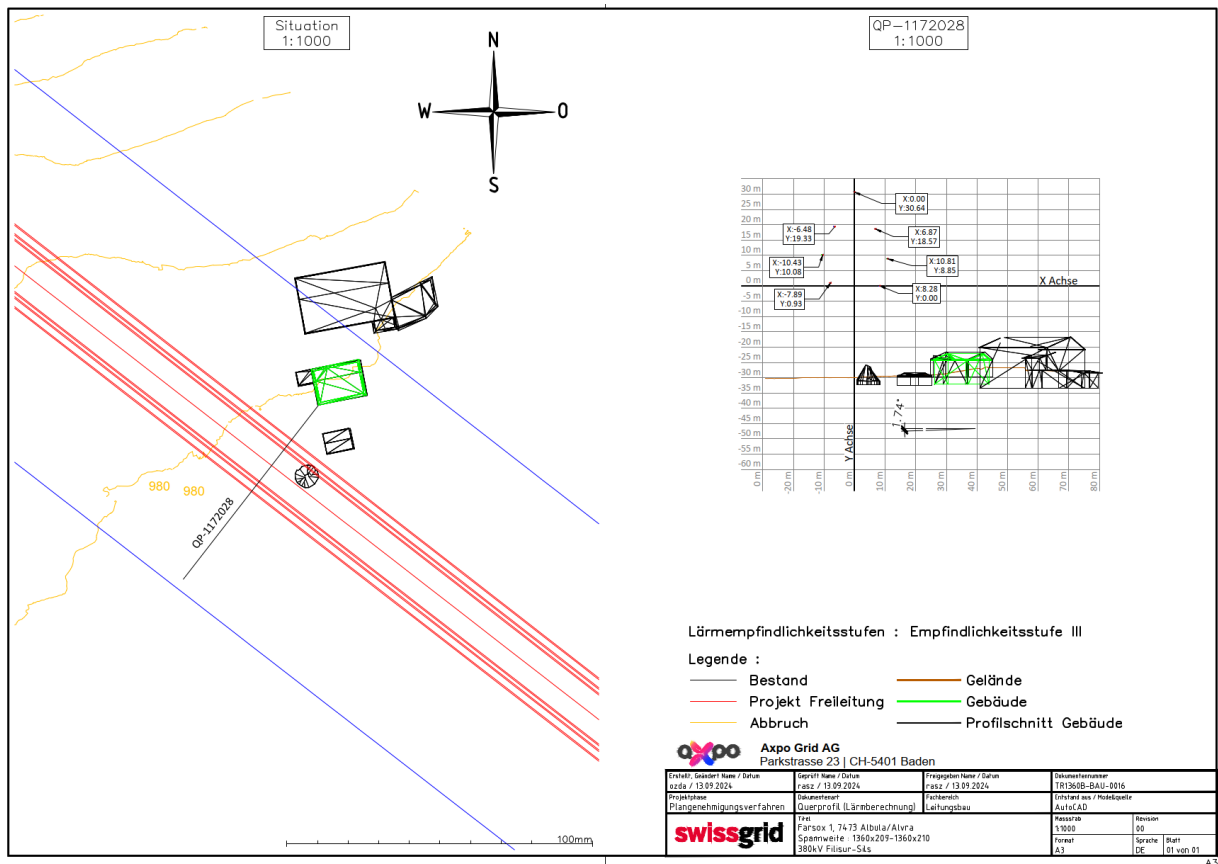
Lärmempfindlicher Ort 2



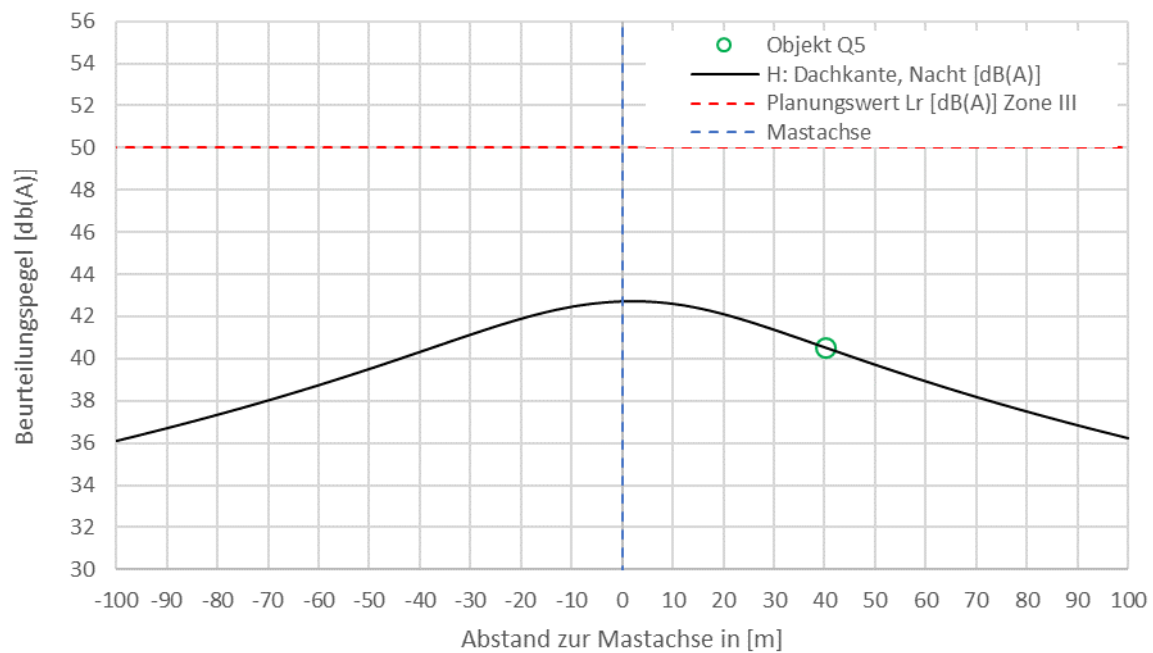
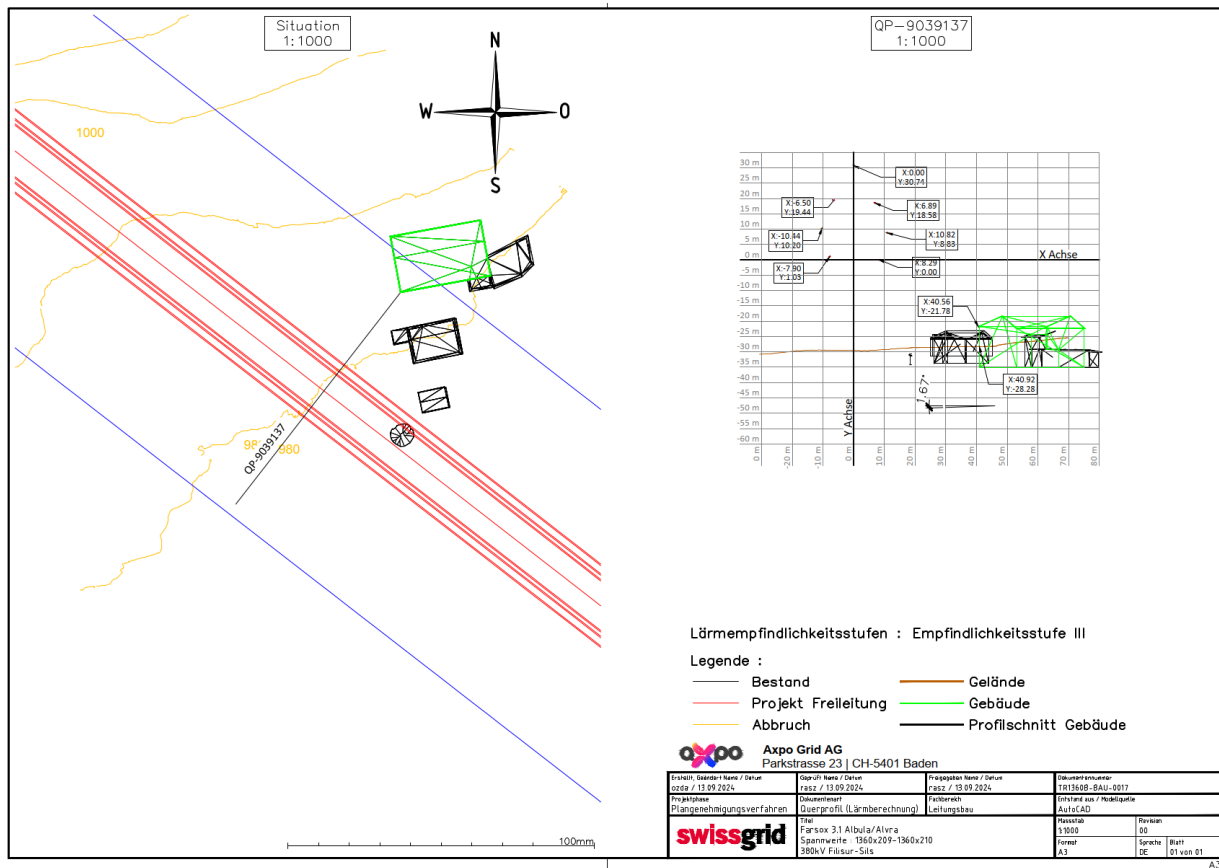
Lärmempfindlicher Ort 3



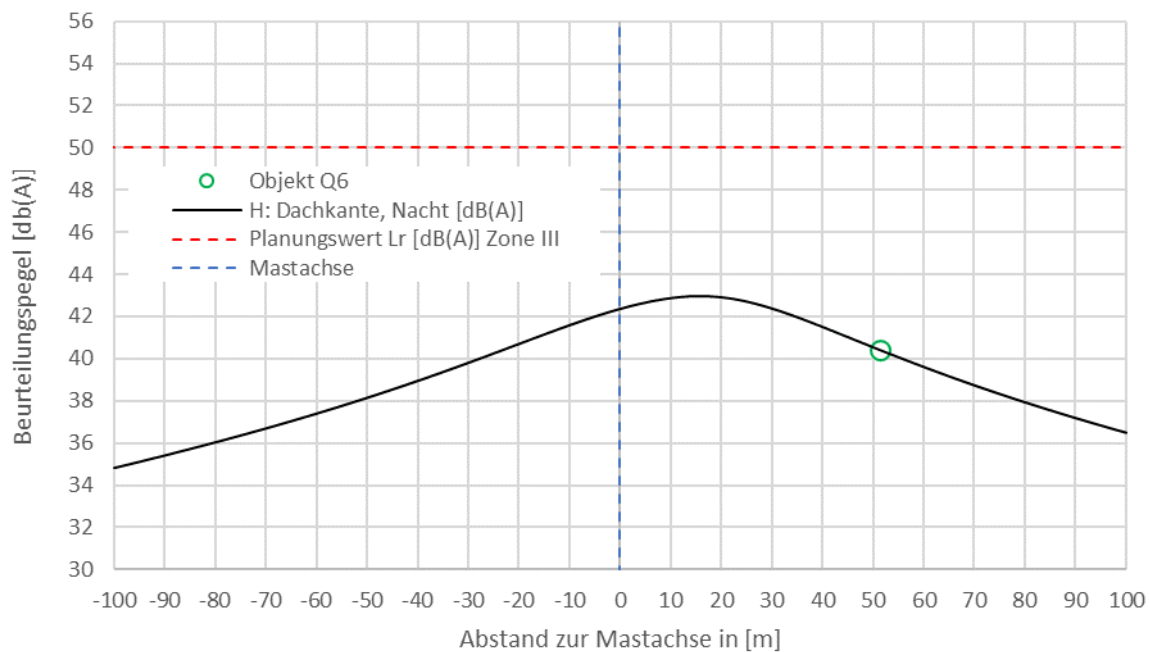
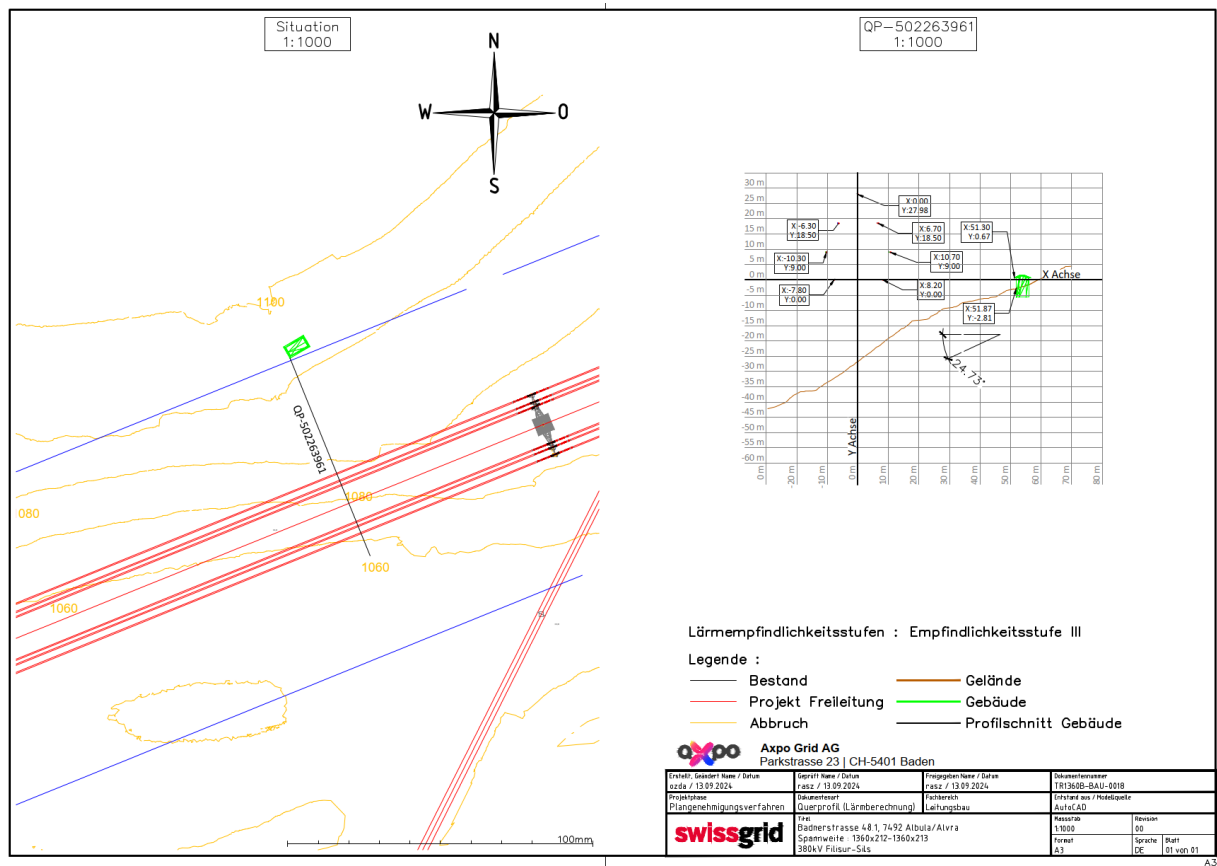
Lärmempfindlicher Ort 4



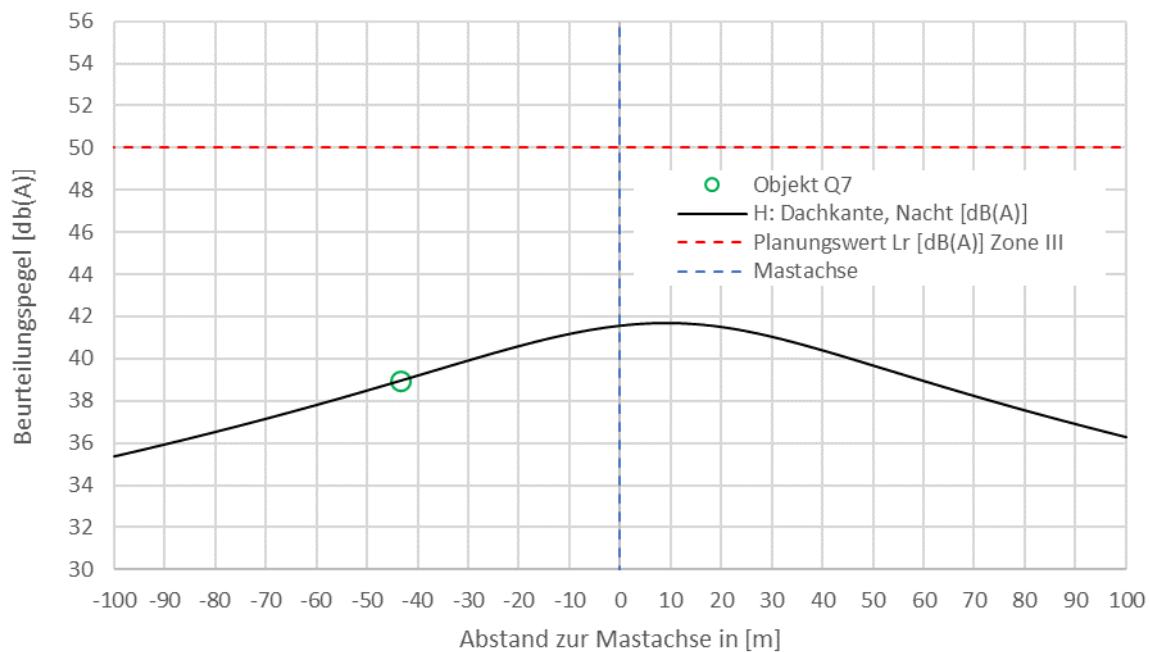
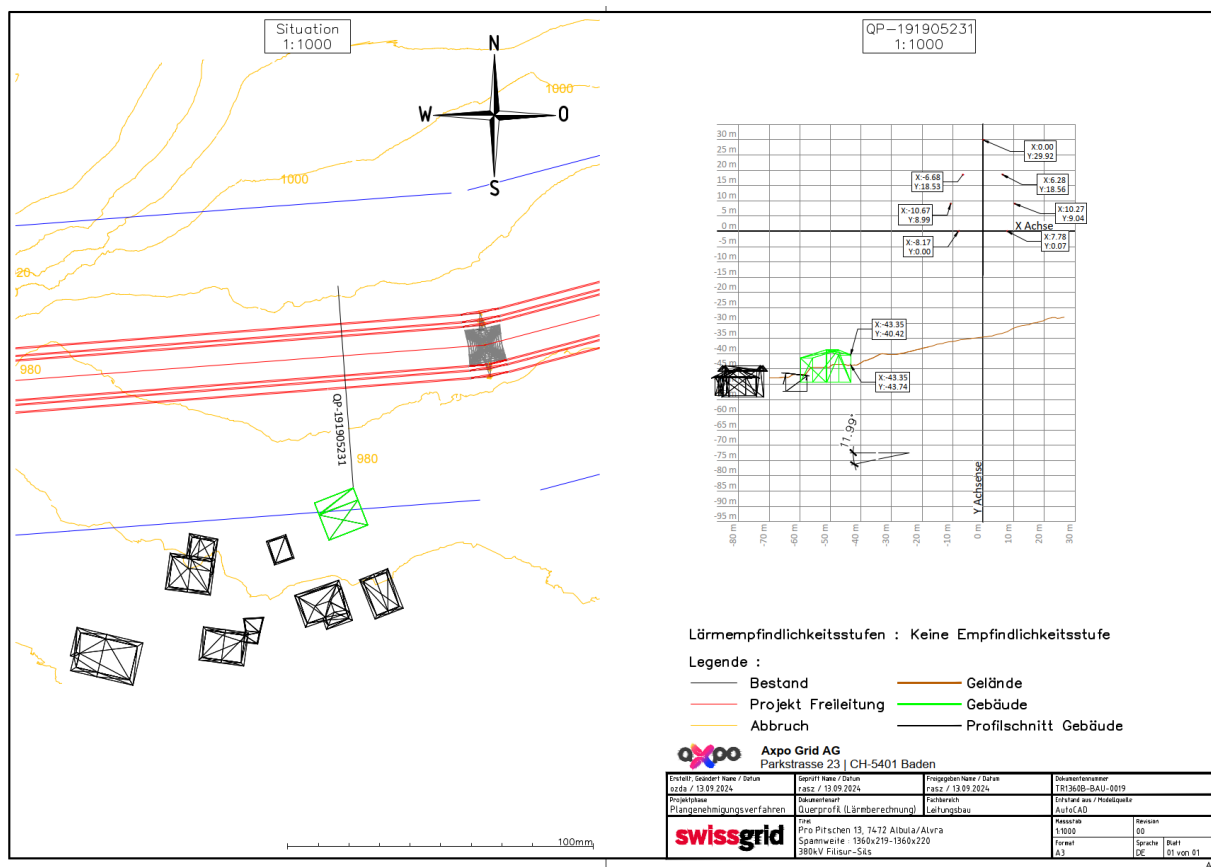
Lärmempfindlicher Ort 5



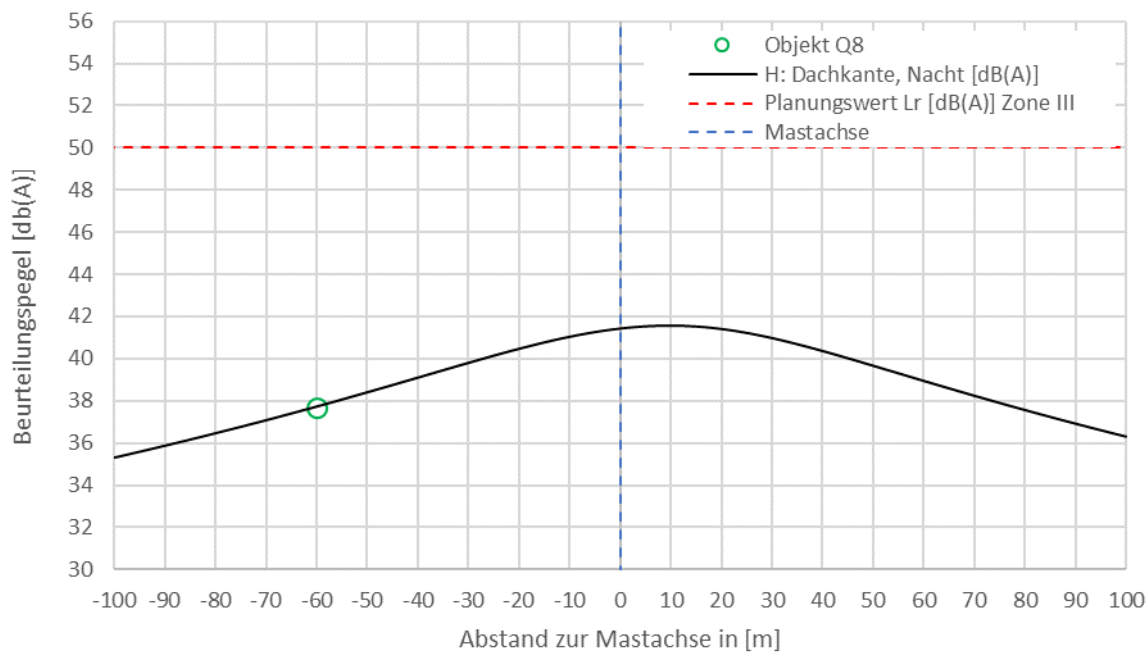
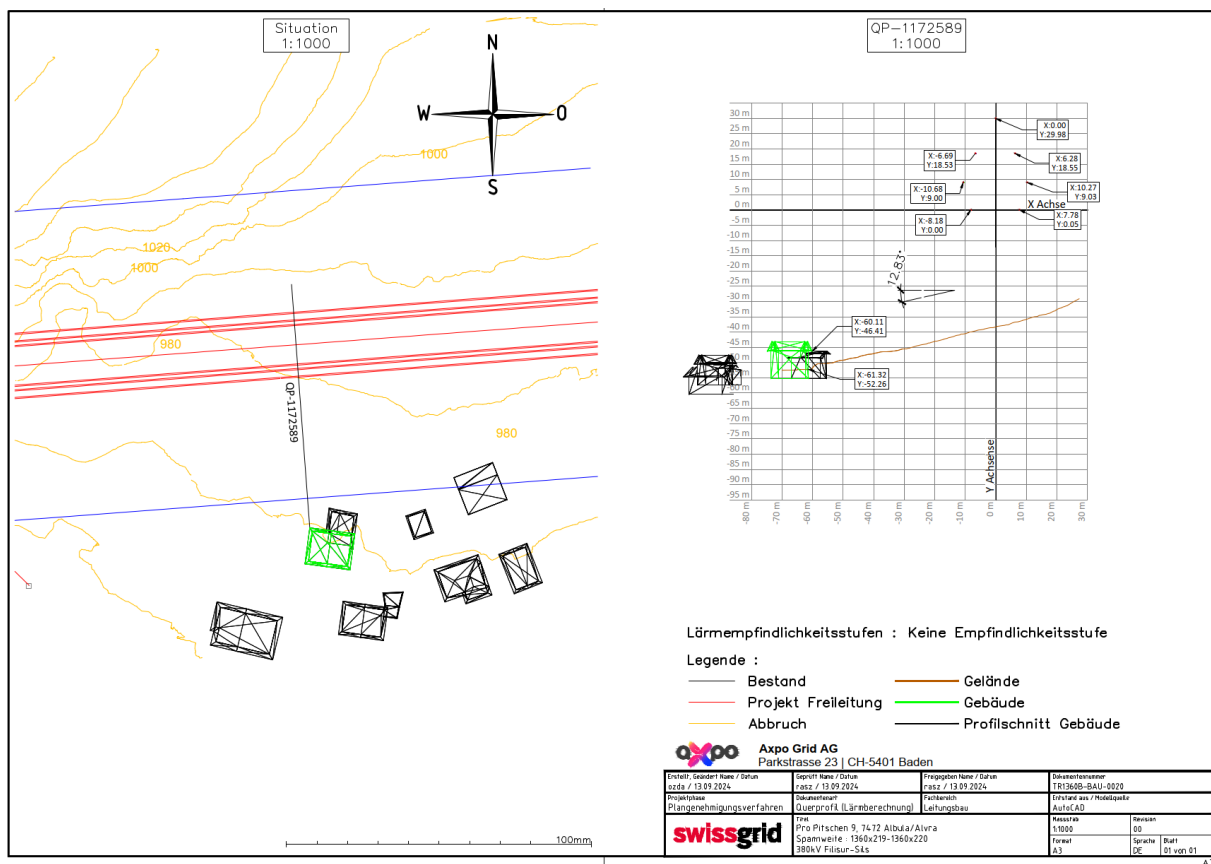
Lärmempfindlicher Ort 6



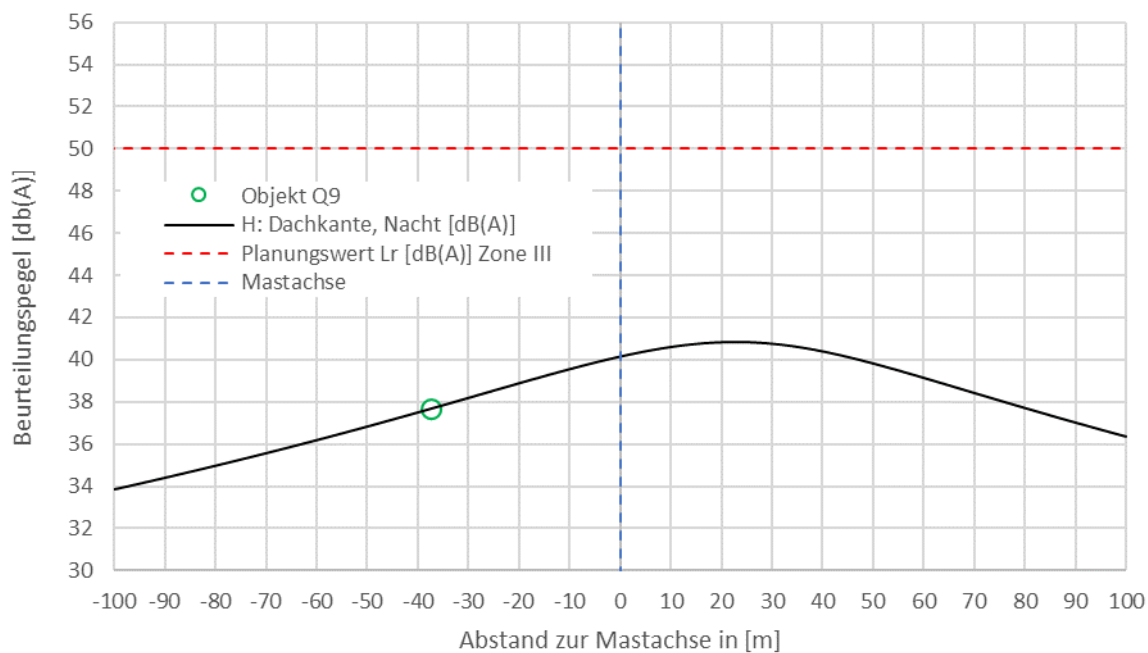
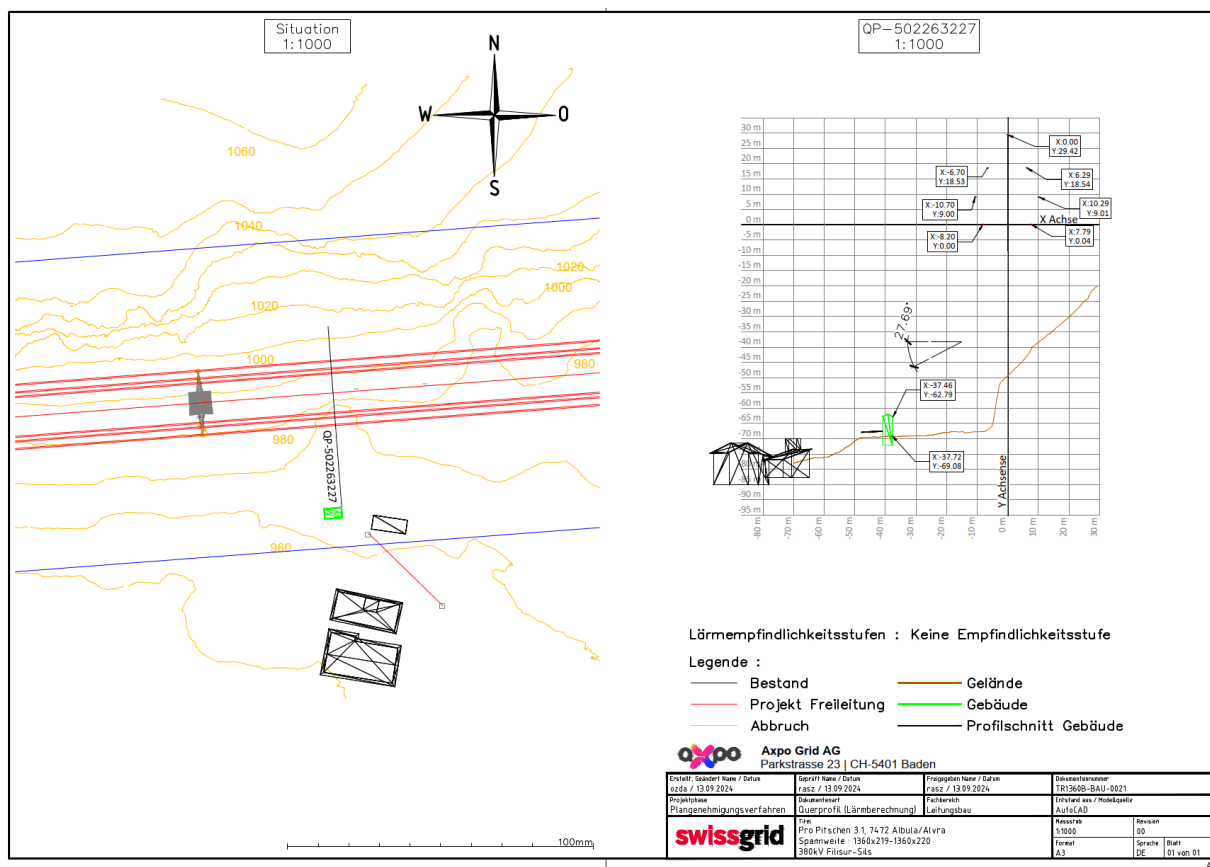
Lärmempfindlicher Ort 7



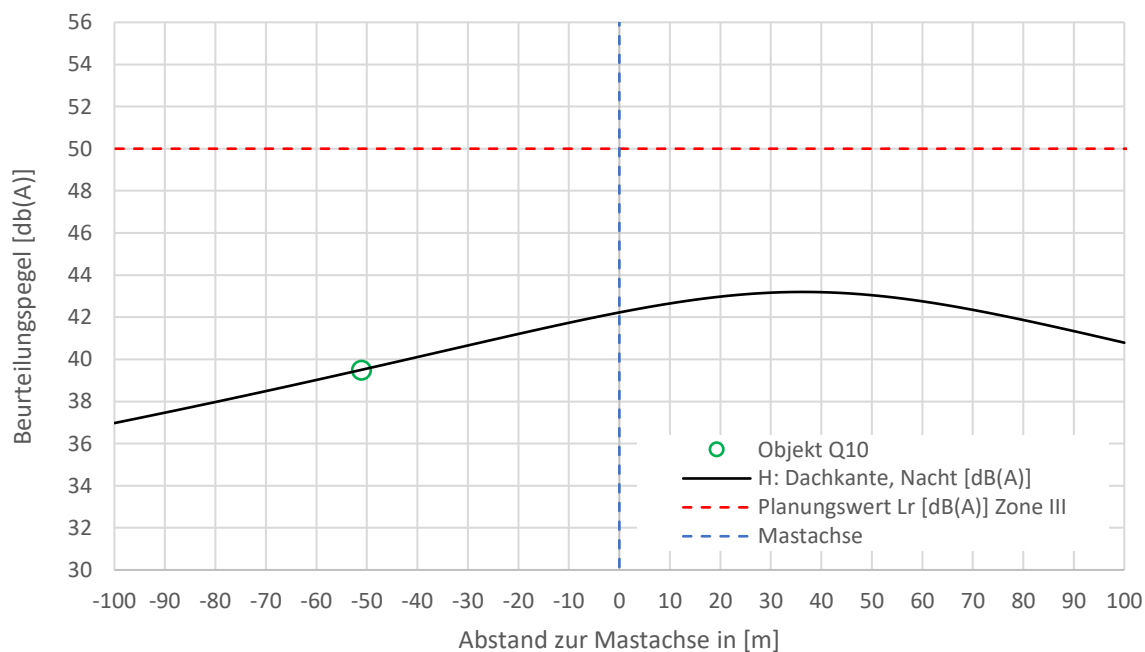
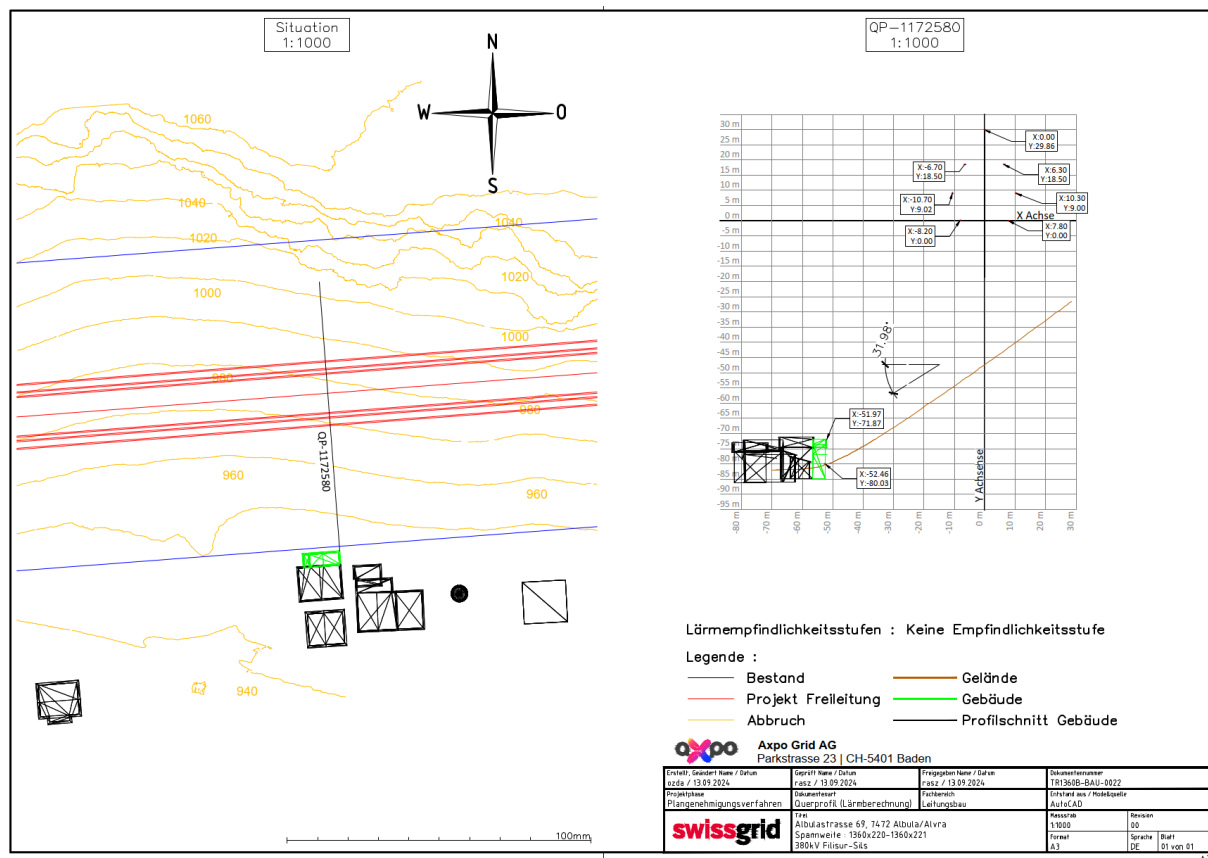
Lärmempfindlicher Ort 8



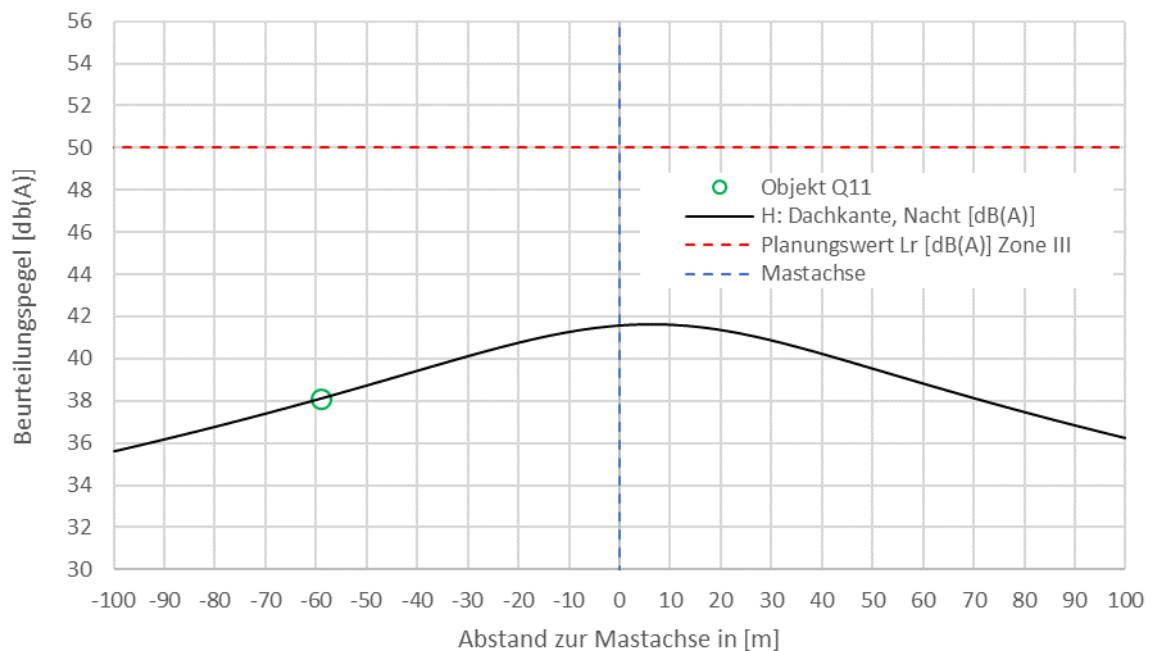
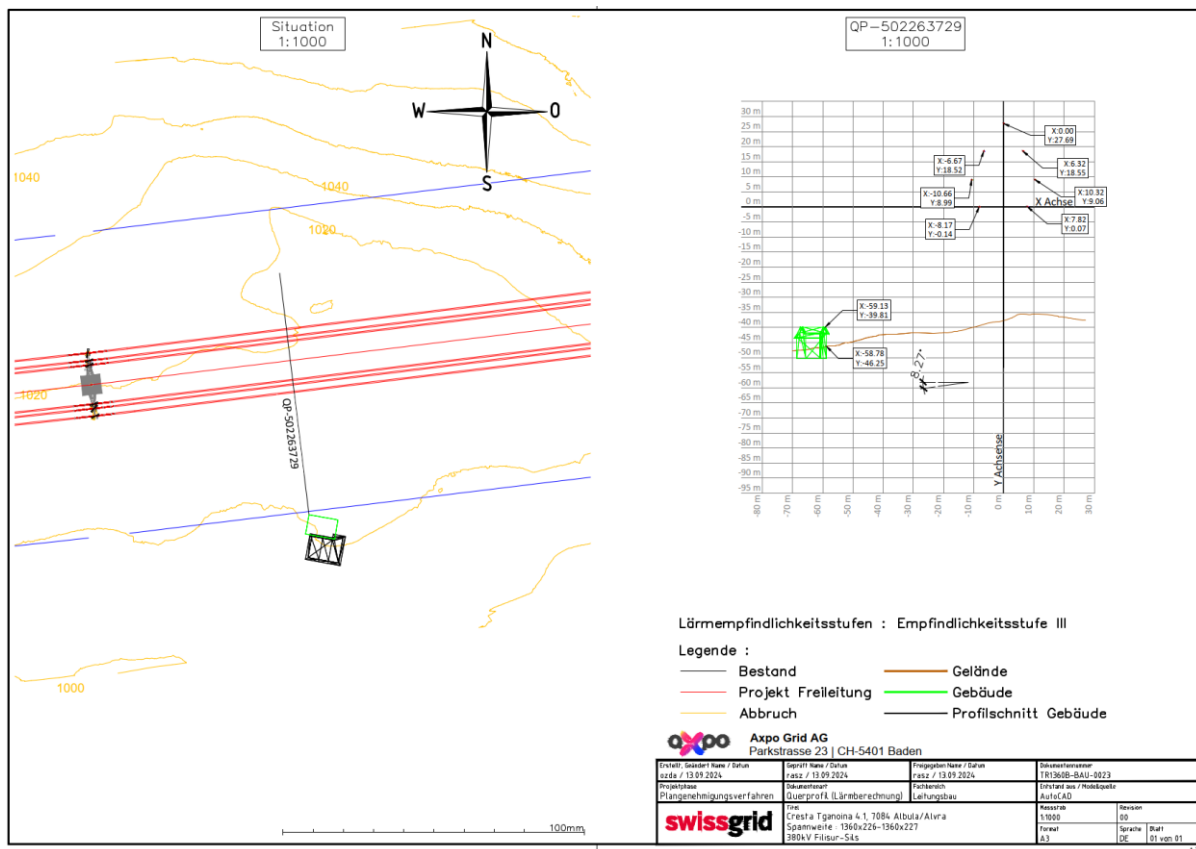
Lärmempfindlicher Ort 9



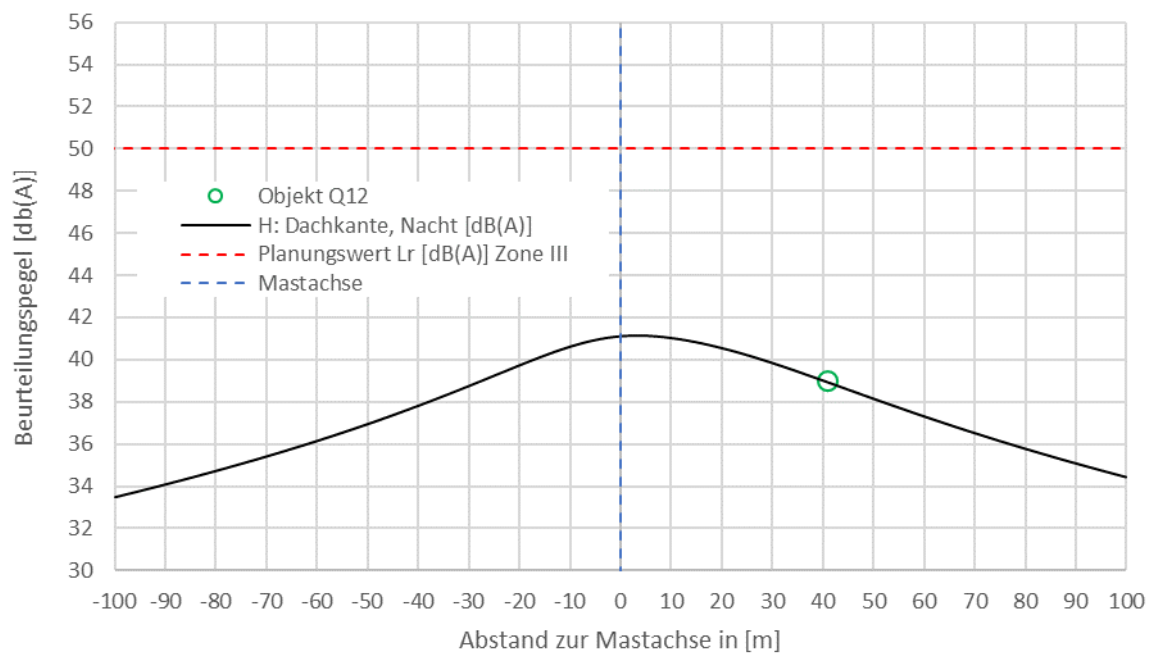
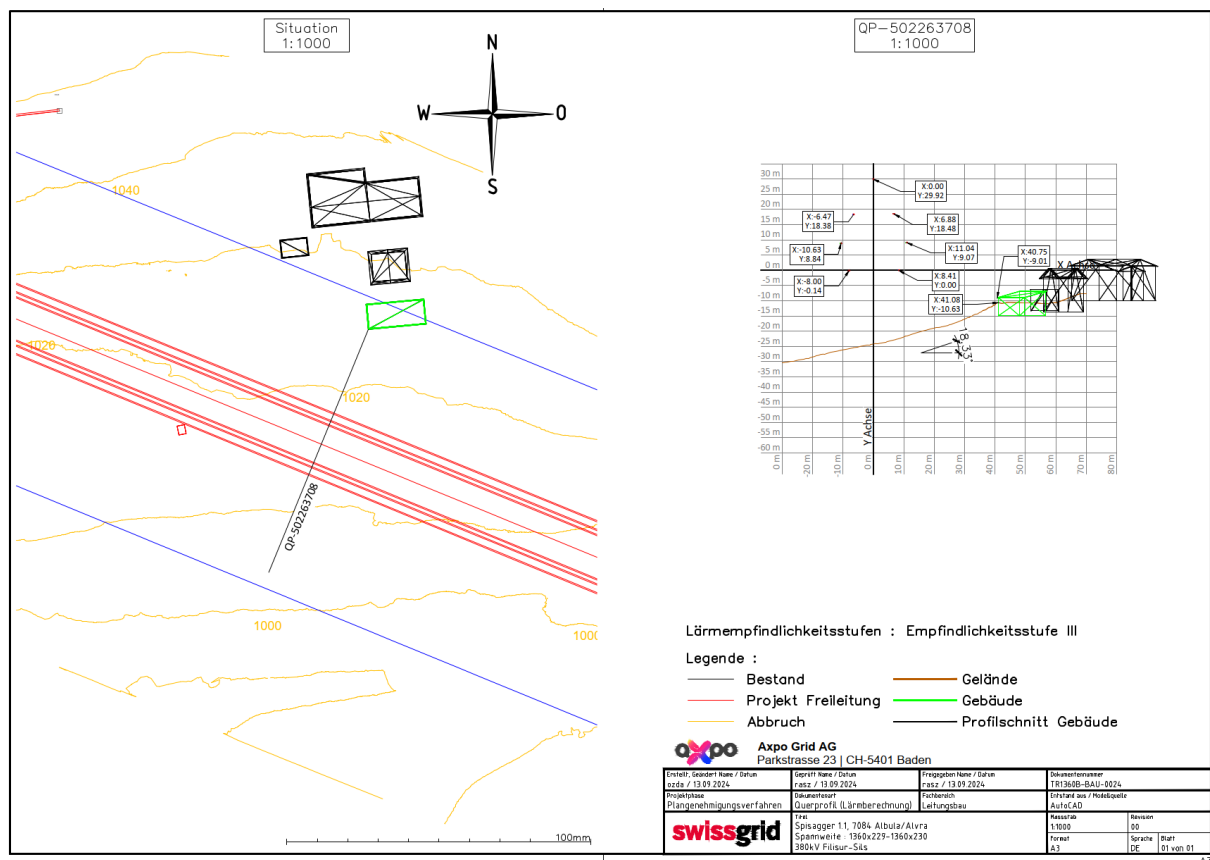
Lärmempfindlicher Ort 10



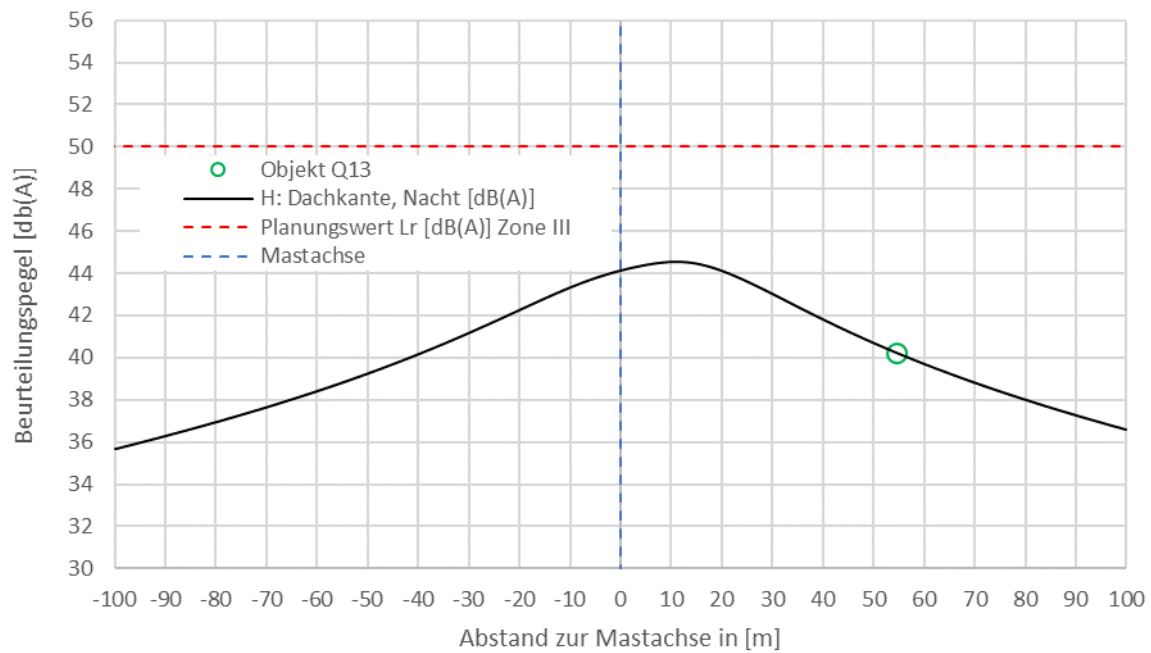
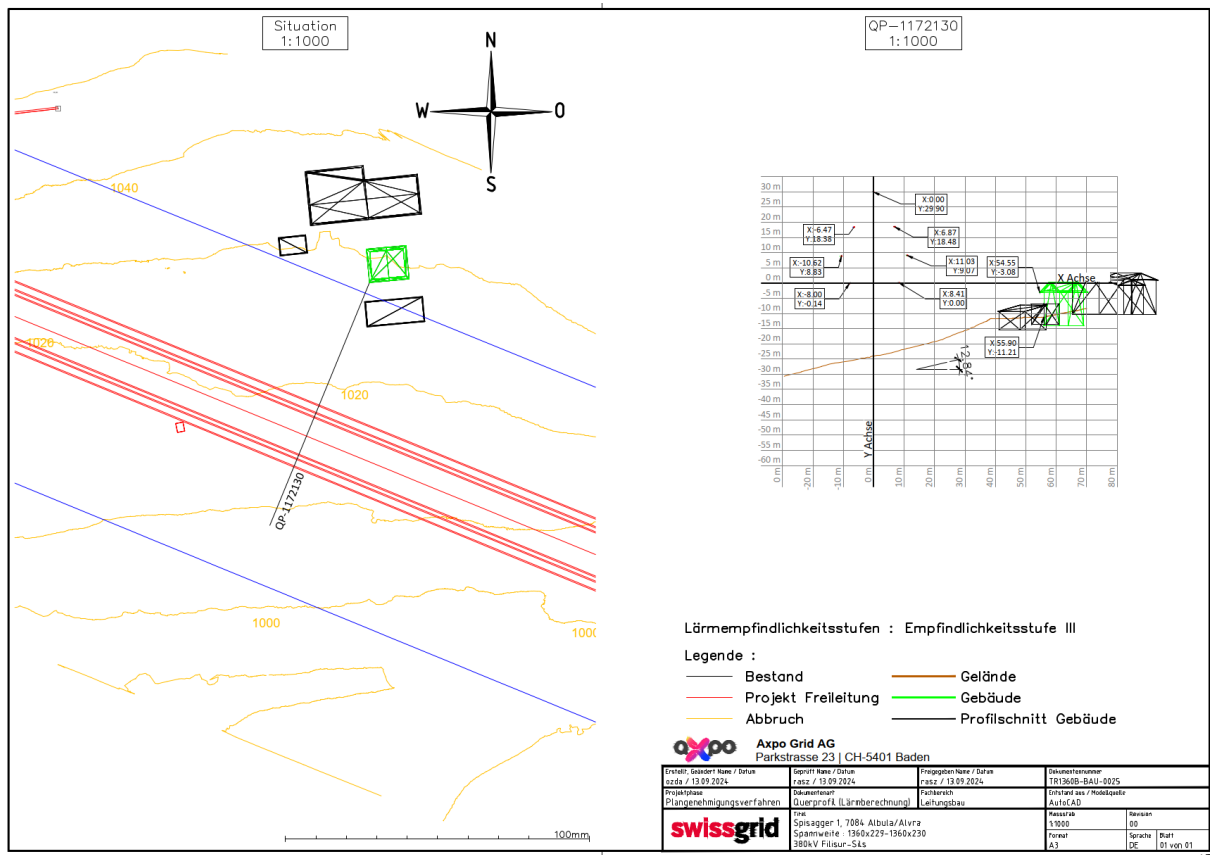
Lärmempfindlicher Ort 11



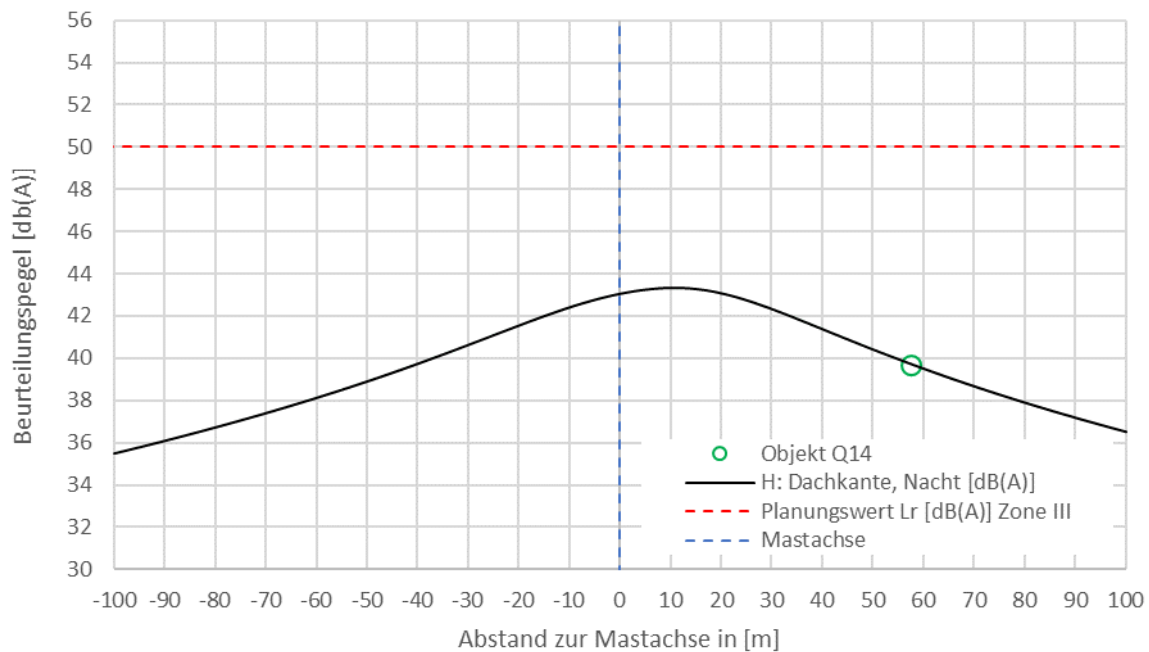
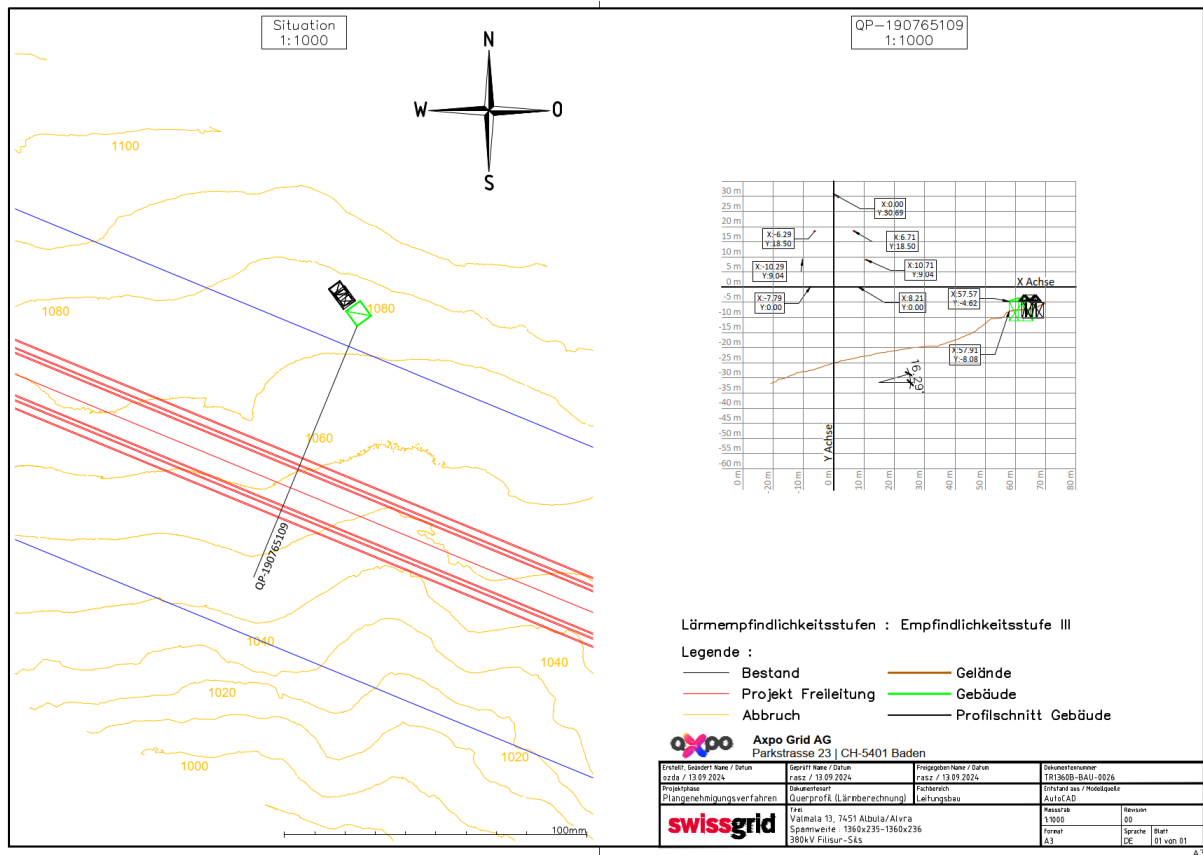
Lärmempfindlicher Ort 12



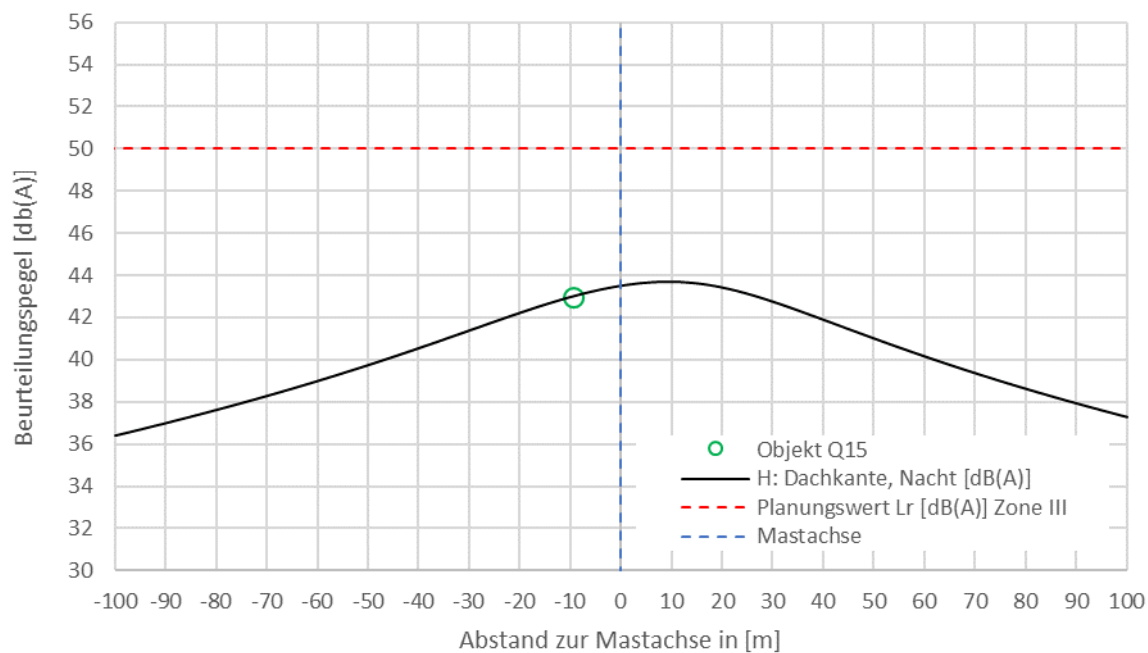
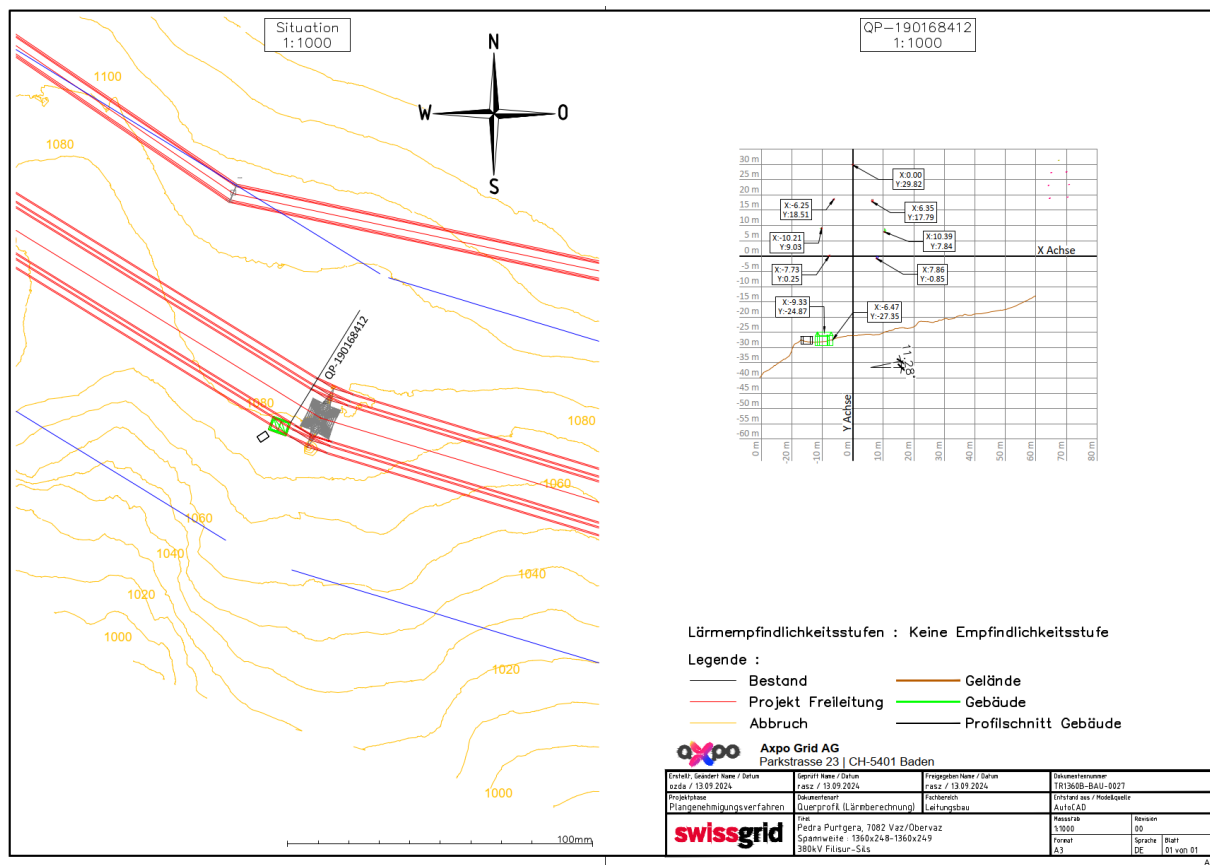
Lärmempfindlicher Ort 13



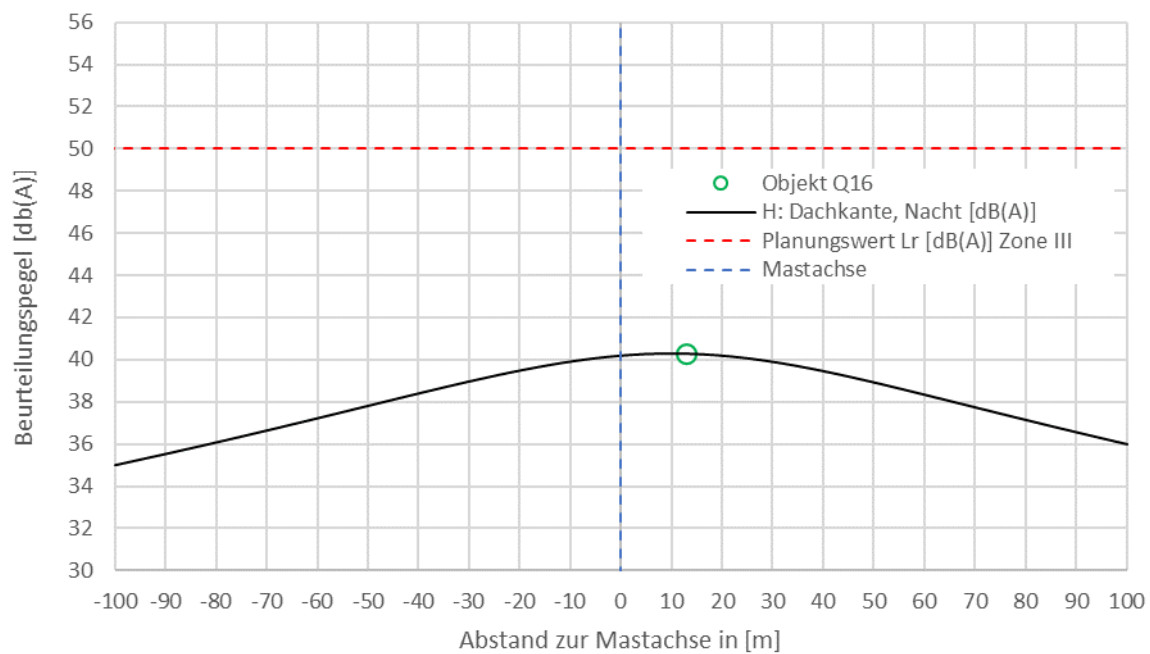
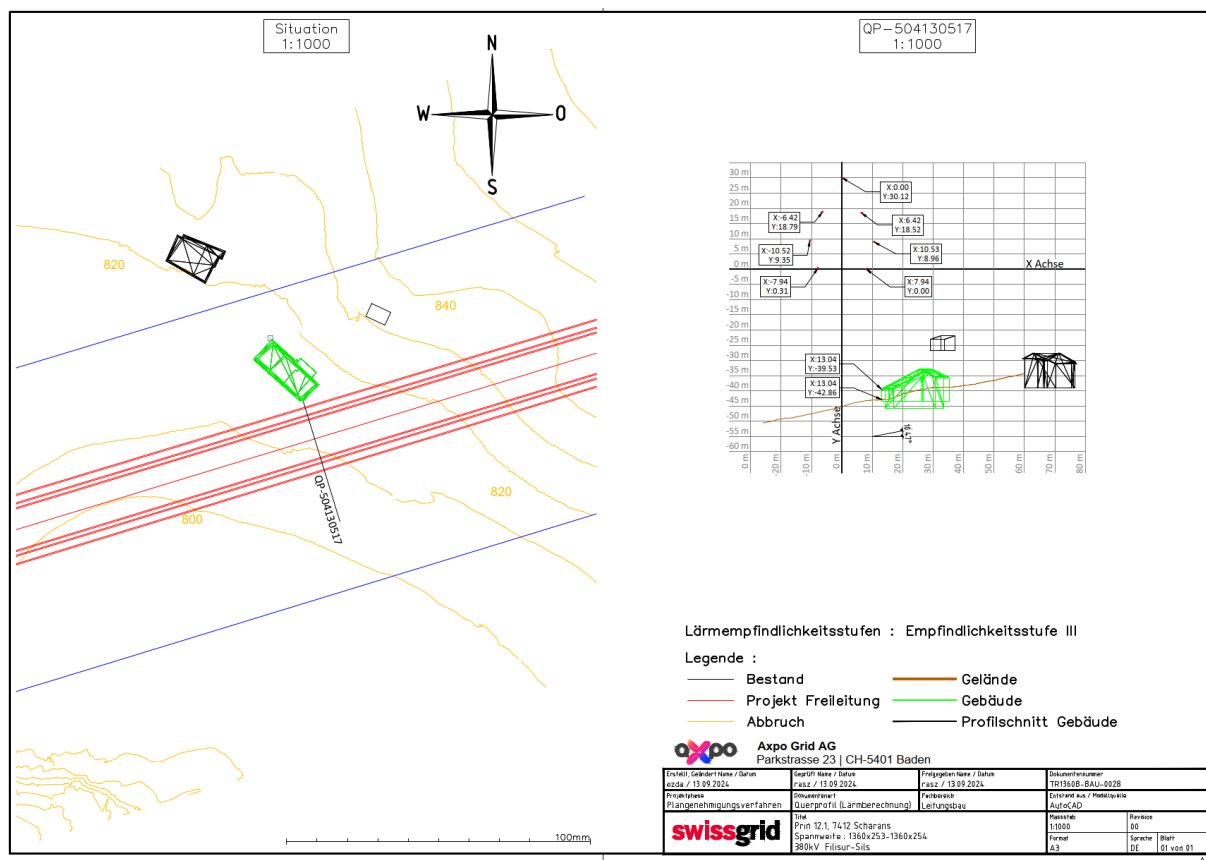
Lärmempfindlicher Ort 14



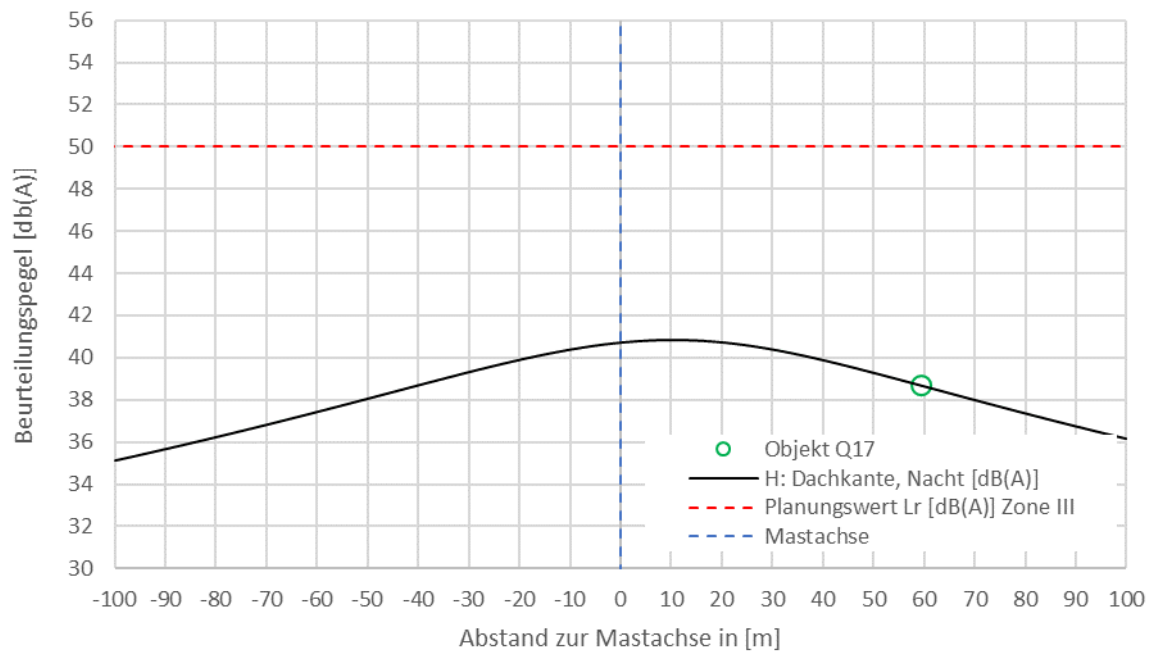
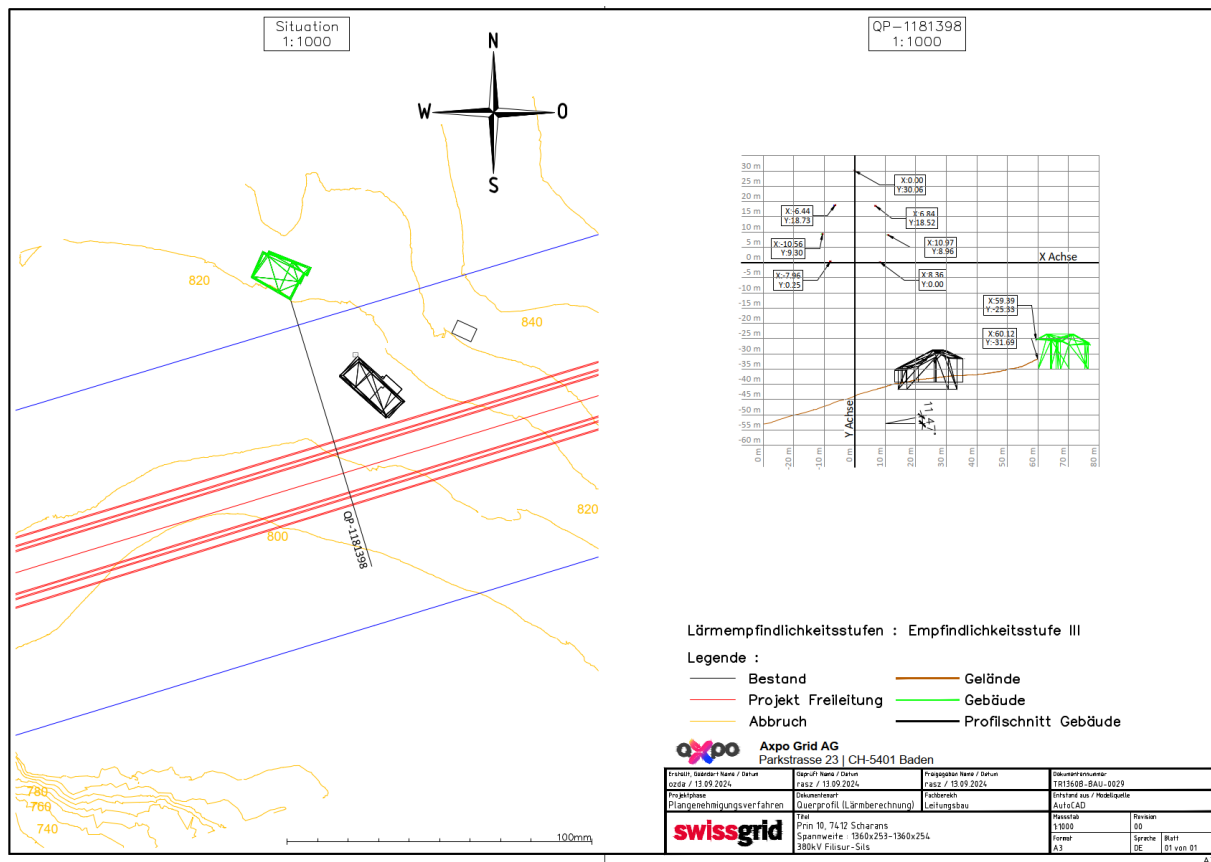
Lärmempfindlicher Ort 15



Lärmempfindlicher Ort 16



Lärmempfindlicher Ort 17



Anhang A2

Mathematische Beziehungen zur Berechnung

Die Berechnung elektromagnetischer Felder beruht auf physikalischen Grundgesetzen, die für eine vorgegebene Leitergeometrie zu einer eindeutigen Lösung führen. Anders sind die Verhältnisse bei der theoretischen Abschätzung von Korona-Verlusten und -Emissionen. Der Zusammenhang zwischen der für die Koronaentladungen ausschlaggebenden Betriebsspannung an den Leiterseilen und dem messbaren akustischen Emissionspegel ist von einer Vielzahl physikalischer Prozesse bestimmt, welche vom lokalen Leiterseilzustand und von der Umwelt stark abhängen. Eine exakte Berechnung der Emissionspegel mittels physikalischer Grundgesetze ist daher nicht möglich. Die mathematischen Abschätzungen beruhen deshalb auf **empirischen Formeln**, welche sich auf Messungen an Modell-Leitungen im Maßstab 1:1 abstützen. Um die Reproduzierbarkeit der angegebenen Resultate sicherzustellen, bedarf es einer Dokumentation des Rechenvorgangs, welcher hier im Folgenden wiedergegeben wird.

Die angeführten beiden Methoden wurden im Wesentlichen aus den Literaturstellen [4-7] übernommen und in gekürzter Form zusammengestellt.

Berechnung der maximalen Randfeldstärke

Das mittlere Feld $\bar{E}$ [V/m] auf der Oberfläche eines Leiterseils berechnet sich wie folgt:

$$\bar{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r_s} \quad (1)$$

r_s : Leiterseilradius [m]

q : Ladung pro Seillänge [C/m]

Dabei entspricht die elektrische Ladungsdichte q [C/m] dem Effektivwert der Ersatzlinienladung im Leiterzentrum, welche auch für die Berechnung der E-Feldprofile benötigt wird.

Im Folgenden werden aus praktischen Gründen die Längenmaße im Leiterseilbündel Bündel in [cm] und die Feldstärken [kV/cm] angegeben.

Die maximale Feldstärke $E_{\max}$ [kV/cm] an der Oberfläche entlang des Umfangs eines ideal glatten Leiterseils berechnet sich aus der mittleren Feldstärke $\bar{E}$ [kV/cm] gemäß Literatur [6], Kapitel I.3, S. 15. Für die Bestimmung von $\bar{E}$ wird jeweils der Mittelwert der Leiter im je Leiterbündel ermittelt:

$$E_{\max} = \bar{E} \cdot \left\{ 1 + \frac{(n-1) \cdot r_s}{R_k} \right\} \quad (2)$$

r_s : Leiterseilradius [cm]

n : Anzahl Leiterseile des Bündelleiters

R_k : Kreisradius, auf dem die Leiterseile des Bündels liegen [cm]

EPRI-Methode zur Berechnung des A-gewichteten Koronaschalls nach [4]

Für die Bestimmung des Emissionswerts (L_0) eines Phasenbündels (Schallpegel in 1 m Abstand von der Bündelachse) werden aus dem EPRI-Handbuch Ed. 3 [5] folgende Beziehungen abgeleitet.

für $n < 3$:

$$L_0 = 20 \log_{10}(n) + 44 \log_{10}(d) - \frac{665}{E} + K_n - 1.07 \cdot \Delta A \cdot \log_{10} \frac{RR}{6.5} + \frac{h-300}{300} + 75.2 \quad (2)$$

mit

$$K_n = 7.5 \text{ dB(A)} \text{ für } n = 1 \quad K_n = 2.6 \text{ dB(A)} \text{ für } n = 2$$

$$\Delta A = 8.2 - \frac{346.5}{E \cdot d^{0.24}} \text{ [dB(A)]}$$

für $3 \leq n \leq 8$:

$$L_0 = 20 \log_{10}(n) + 44 \log_{10}(d) - \frac{665}{E} + 22.9(n-1) \frac{d}{D} - 1.07 \cdot \Delta A \cdot \log_{10} \frac{RR}{6.5} + \frac{h-300}{300} + 67.9 \quad (3)$$

mit

$$\Delta A = 10.4 - \frac{346.5}{E \cdot d^{0.24}} + 8(n-1) \frac{d}{D} \text{ [dB(A)]}$$

Symbol, Grösse	Gültigkeitsbereich der Beziehungen
L_0 Emissionswert eines Phasenbündels [dB(A)] bezogen auf 20 μ Pa	
n : Anzahl Einzelleiter im Phasenbündel	1 ... 8
d : $d = 2 r$ Leiterseildurchmesser [cm]	2 ... 6
D : Bündeldurchmesser [cm] Bemerkung: Ist s der Abstand zwischen zwei benachbarten Leitern im Bündel, so ist: $D = s / \sin(\pi/n)$	40 ... 105
E : Maximale Leiterseilfeldstärke im Bündel in [kV _{eff} /cm]	14 ... 20 [kV/cm]
RR : Regenrate in [mm/h]	0.3 ... 8 [mm/h]
h : Höhe über Meer [m] (ev. Höhe über 300 m.ü.M.)	0 ... 4000 [m]
ΔA : Pegelunterschied zwischen Starkregen (6.5 mm/h) und nassen Leiterseilen (0.75 mm/h) in Funktion der Randfeldstärke E	

Die vom Abstand R abhängige Ausbreitungsdämpfung wird berücksichtigt durch Abziehen der Ausbreitungsdämpfung ΔL_p , wobei der Term $0.02 R$ optional die Absorption des Schalls durch die Luft grob berücksichtigt.

$$\Delta L_p = 10 \cdot \log_{10}(R) + 0.02 \cdot R \quad (4)$$

R : Abstand zum Messort [m]

$$L_p(R) = L_0 - \Delta L_p \quad (5)$$

Bestimmung des Gesamtschallpegels aus den Anteilen jedes Leiterbündels

Für die Berechnung des gesamten Schalldruckpegels einer Freileitung an einer bestimmten Position in der Umgebung der Leitung müssen die Schalldruckpegel der einzelnen Leiterseilbündel k in Schalldruckeffektivwerte $\tilde{p}_k$ umgerechnet werden. Der totale Schalldruckeffektivwert $\tilde{p}_{tot}$ ist dann die Wurzel der Quadratsumme der Schalldruck-Anteile aller Bündelleiter. Der totale Schalldruckpegel $L_{p,tot}$ berechnet sich demnach in folgenden drei Schritten:

$$\tilde{p}_k = 10^{(L_{p,k}/20)}, \quad \tilde{p}_{tot} = \sqrt{\sum_k \tilde{p}_k^2}, \quad L_{p,tot} = 20 \cdot \log_{10} \tilde{p}_{tot}$$

oder zusammengefasst:

$$L_{p,tot} = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \sum_k 10^{(L_{p,k}/10)} \right\} \quad (6)$$

$\tilde{p}$: Effektivwert des Schalldrucks [Pa]

k : Fortlaufende Nummer der Bündelleiter