

Auftraggeber

IWB
Margarethenstrasse 40
CH- 4002 Basel

Auftragsbezeichnung

Machbarkeitsstudie für eine H2 Transportleitung

Berichtstitel

**Machbarkeitsstudie für die Auslegung
und Trassierung einer Wasserstoffleitung**

Beispielprojekt zur Empfehlung H1000

Verfasser

Christian Gally
Mark Imm

Gruner AG
St. Jakobs-Strasse 199
CH-4020 Basel
T +41 61 367 95 95
www.gruner.ch

Auftragsnummer

R 000'000'000-00

Datum

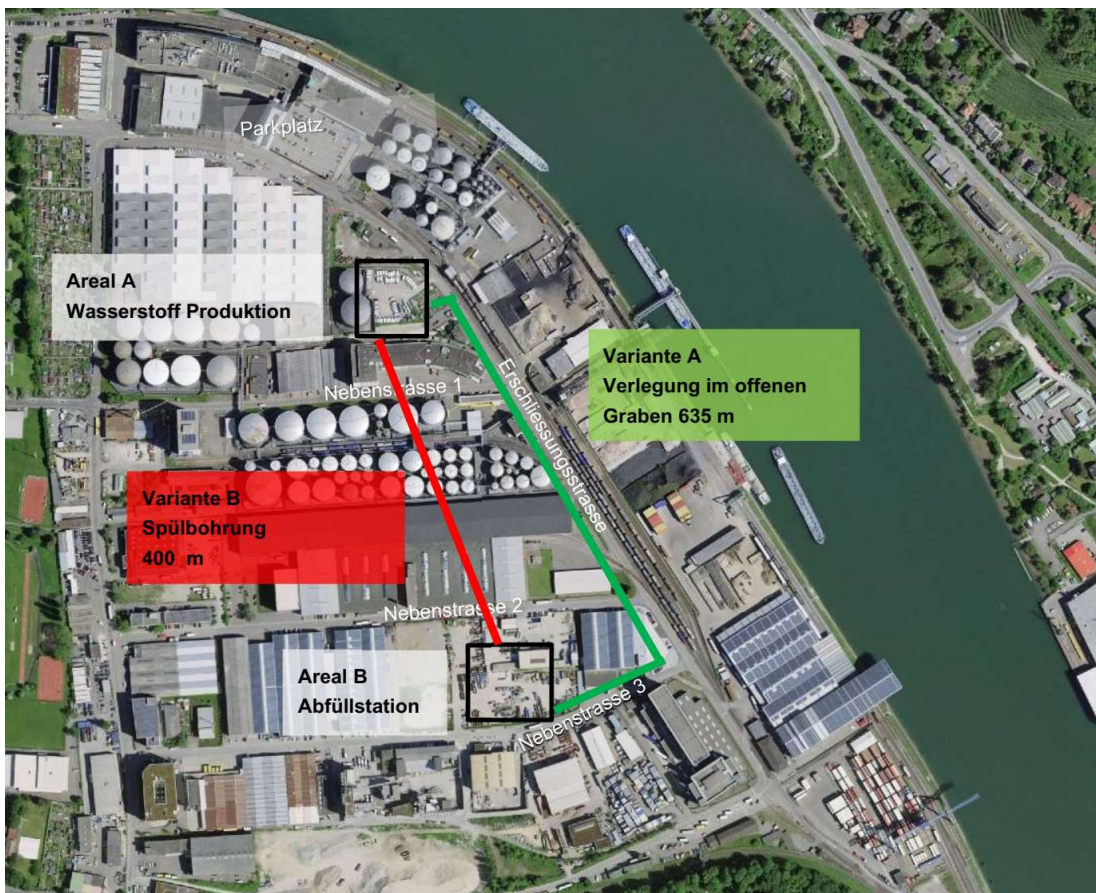
17.Mai.2023

Zusammenfassung

Ausgangslage

Diese Studie untersucht mit Hilfe der "Empfehlung H1000" des SVGW eine Machbarkeit für die Verlegung einer Wasserstoffrohrleitung in einem Industriegebiet. Die Wasserstoffleitung verbindet eine Wasserstoffproduktion mit einer Abfüllstation und Tankstelle (siehe Abbildung 1). Die Leitung ist auf eine Transportkapazität von 30 MW Wasserstoff auszulegen.

Abbildung 1 Übersichtsbild Situation Verbindungsleitung Areal A und Areal B in einem Industriegebiet



Ziel der Studie

Folgende Themen zur Verbindungsleitung zwischen Wasserstoffproduktion und Abfüllstation sind zu evaluieren:

- Anordnung der Rohrleitungen
- Druckniveau
- Werkstoffauswahl für die Rohrleitungen
- Wandstärkenberechnung
- Trassierung und Verlegung
- Kosten

Methodik

Als Leitfaden zur Erreichung der Ziele dient die Empfehlung "H1000 von SVGW zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff".

Ergebnisse

Druckniveau, Werkstoffe für Rohrleitungen, Wandstärke

Auf Grundlage der Empfehlungen für Werkstoffe aus der H1000 wurde in Absprache mit IWB die Werkstoffe aus Tabelle 1 für die nähere Untersuchung ausgewählt.

Zu Beginn wurden auch Stahlleitungen aus L290 NE untersucht (gemäss Vorschlag aus der H1000). Dabei handelt es sich um Stahl der häufig für Pipelines verwendet wird. Abklärungen ergaben, dass solche Leitungen erst ab DN100 erhältlich sind. Für die vorliegende Anwendung genügen Rohrleitungen in DN50. Deshalb wurde dieses Material nicht weiter untersucht.

Tabelle 1 Übersicht und Ergebnisse für einsetzbare Rohrmaterialien

Material/Werkstoff	Druck [bar]	DN	Wandstärke	Kosten [CHF / m] *
P235 TR1	40	50	3.2 mm	17.64
P355 N	40	50	3.2 mm	18.83
X2CrNiMo17-12-2 (1.4404)	40	50	3.6 mm	30.44
Kunststoffverbundrohr (RTP, H2T) H2T-Soluforce	40	4 Inch D _o = 125 mm, D _i = 98 mm	13.5 mm	100
P355 N	750	50	14.2 mm	54.43

*Kosten pro /m bezieht sich auf den Einkaufspreis der Rohrleitung (ohne Verlegung), Gesamtkosten je nach Verletechnik folgen in Tabelle 2.

Aus Tabelle 1 kann folgender Schluss gezogen werden.

- Für 40 bar Leitungen können alle in Tabelle 1 aufgeführten Werkstoffe eingesetzt werden.
- H2T Rohre aus RTP (z.B. Soluforce Hydrogen Tight H2T) sind bis 40 bar einsetzbar. Sie sind ab einem Innendurchmesser von 98 mm verfügbar. Diese Rohrleitungen sind auf Rollen à 400 m erhältlich und können dann direkt verlegt werden. Obwohl die minimal erhältliche Rohrdimension grösser ist als nötig, wird dieses System geprüft, aufgrund der flexiblen Verletechnik.
- Für den Einsatz bei 750 bar erwies sich von den untersuchten Werkstoffen nur der P355N als geeignet. Für den untersuchten Edelstahl (1.4404) konnten keine, im üblichen Lieferprogramm der Hersteller vorhandenes Rohr gefunden werden. Es müssten dafür andere Edelstahlleitungen mit anderer Werkstoffzusammensetzung geprüft und ausgelegt werden.
- Eine Leitung mit 750 bar muss gemäss Dimensionierung mit derselben Rohrdimension (DN, Aussendurchmesser) wie bei 40 bar gebaut werden. Der bei 750 bar kleinere Volumenstrom für die gleiche Transportkapazität führt zunächst zu einer kleineren Dimension, die nötige grössere Wandstärke auf

Grund des höheren Drucks führt dann wieder zu einer grösseren Rohrdimension (Aussendurchmesser). Für beide Druckniveaus (750 bar und 40 bar) wird eine DN50 Leitung eingesetzt, jedoch mit unterschiedlichen Wandstärken.

Anordnung der Rohrleitung und Druckniveau

Es wird eine Anordnung der Rohrleitung mit Aufbereitung (Kompression und Reinigung auf Beschaffenheit Gruppe D) bei der Abfüllstation auf Parzelle A gewählt. Das Druckniveau der Verbindungsleitung wird auf 40 bar und einer Beschaffenheit der Gruppe A gewählt. Dadurch wird zudem die Flexibilität für Ausbauten sichergestellt. Die Elektrolyse kann mit einem Ausgangsdruck von 40 bar gewählt werden und ohne Reduktion oder Kompression direkt die Leitung versorgen.

Trassierung und Verlegung

Untersucht werden zwei Varianten für die Trassierung der Wasserstoffleitung im untersuchten Industriegebiet.

Variante A: Verlegung im offenen Graben in der Erschliessungstrasse und Nebenstrasse 3. Siehe Abbildung 1 grüne Linie

Variante B: Spülbohrung auf direktem Weg von der Wasserstoffproduktion zur Abfüllstation. Siehe Abbildung 1 rote Linie

Beide Varianten haben sich als technisch machbar erwiesen.

Aus dem Variantenvergleich geht hervor, dass die Verlegung der Leitung nach Variante B (Spülbohrung) die vorteilhaftere und kostengünstigere Variante ist. Es ist zu erwähnen, dass für die Varianten keine projektspezifische Risikoanalyse und Bewilligungsfähigkeit abgeklärt wurden.

Kosten

Die Zusammenstellung der Kosten pro Meter für den Einbau der Rohrleitungen (siehe Tabelle 2) ergibt, dass die Beschaffungskosten für die Rohrleitungen (siehe Tabelle 1), gegenüber den Aufwänden für Tiefbau und Verlegung kaum Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Die H2T Leitung aus RTP wird deshalb günstiger, weil die Verlegung weniger Kosten verursacht.

Tabelle 2 Schätzung Kosten für Verlegung im offenen Graben oder mit Spülbohrung

	Stahl P235 TR1 DN 50 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) DN 50 40 bar	RTP Soluforce H2T 4" DN 100 40 bar	Stahl P355N DN 50 750 bar
	Variante A offener Graben			
spezifische Kosten pro Trassenmeter.	1'650 CHF/m	1'710 CHF/m	1'550 CHF/m	1'735 CHF/m
Trassenlänge	625 m	625 m	625 m	625 m
Total Kosten *	1'448'250	1'448'250	1'448'250	1'517'375
	Variante B Spülbohrung			
spezifische Kosten pro Trassenmeter.	1'350 CHF/m	1'410 CHF/m	1'250 CHF/m	1'435 CHF/m
Trassenlänge	400 m	400 m	400 m	400 m
Total Kosten *	601'000	625'000	556'000	635'000

* Total Kosten beinhalten neben der Leitungsverlegung auch Aufwände für Schachtbauwerke, Start- und Zielgruben sowie Inbetriebnahme usw. Details siehe Kapitel 5

Die Verlegung der H2T Rohrleitung mit einer Spülbohrung ist die kostengünstigste Variante.

Empfehlung

Es wird empfohlen, die Verbindungsleitung auf einem Druckniveau von 40 bar auszulegen und mit einem fertigen H2T Rohrsystem von z.B. Soluforce auszuführen. Die Aufbereitung auf Druck und Beschaffenheit für die Tankstelle ist auf dem Areal B auszuführen. Die Verlegung der Rohrleitung mittels Spülbohrung ist am kostengünstigsten.

Für die Ausführung als direkte Verbindungsleitung von Areal A nach Areal B bildet diese Variante die kostengünstigste Lösung ab. Sollen später an der Verbindungsleitung weitere Verbraucher angeschlossen werden (andere Aufgabenstellung), ist die gewählte Lösung neu zu prüfen.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Aufgabenstellung	12
1.1	Ausgangslage	12
1.2	Aufgabenstellung	12
1.2.1	Allgemein	12
1.2.2	Technische Anforderungen an die Verbindungsleitung	12
1.2.3	Ziele	13
1.2.4	Abgrenzung der Aufgabe	13
1.2.5	Basisdokumente	13
2	Anordnung der Rohrleitungen und Wasserstoffaufbereitungsanlage	14
2.1	Projektaufgabe Verbindungsleitung zu einem Abnehmer für Mobilität	14
2.1.1	Vorbemerkung	14
2.1.2	Anordnung 1: Aufbereitung bei der Produktion, Rohrleitungsanlage mit hohem Druck.	14
2.1.3	Anordnung 2: Aufbereitung beim Abnehmer, Rohrleitungsanlage auf dem Druckniveau der Elektrolyse	15
2.1.4	Erweiterte Projektaufgabe	15
2.2	Auswahl Anordnung 1 oder Anordnung 2	15
3	Auslegung der Rohrleitung	16
3.1	Auswahl des Druckniveau für die Wasserstofftransportleitung zum Einsatz in der Mobilität	16
3.1.1	Hinweise zu den Regelwerken	16
3.2	Grundlagen für die Auswahl der Rohrdimension	17
3.3	Verwendung der Leitung und tolerierter Druckverlust	17
3.4	Vorauswahl der Rohrdimension	18
3.4.1	Grundlagen Transportleistung	18
3.4.2	Ansatz mittels der Strömungsgeschwindigkeit	18
3.4.3	Ansatz über den Druckverlust	21
3.4.4	Zwischenfazit Vorauswahl Rohrdimension und Druckniveau	23
3.4.5	Innendurchmesser für 8 mbar/m bei 30 MW Transportleistung	23
3.5	Rohrdimensionen und Werkstoffe	24
3.5.1	Werkstoffe für Rohrleitungen	24
3.5.2	Auswahl Stahlwerkstoffe für Rohrleitungen	24
3.5.3	Berechnung der Wandstärke	25
3.5.4	Auswahl der Rohrleitungen für 750 bar	26
3.5.5	Option zwei parallele Rohrleitungen für 750 bar	27
3.5.6	Zusammenstellung und Vergleich der ausgewählten Rohrleitungen aus Stahl mit Kostenübersicht	28
3.5.7	Fazit Auslegung Rohrleitungen aus Stahl und Systemdruck	28
3.5.8	Rohre aus (Metall-)Kunststoffverbundwerkstoffen (RTP)	29
3.5.9	Auswahl Systemdruck und Rohrleitungen für weitere Betrachtungen.	29
3.6	Korrosionsschutz und Wasserstoffversprödung für erdverlegte Leitungen	30
3.6.1	Äusserer Korrosionsschutz bei erdverlegten Leitungen aus Stahl	30
3.6.2	Oberflächen und Innerer Korrosionsschutz bei Leitungen aus Stahl	30
3.6.3	Korrosionsschutz für Leitungen aus RTP (Soluforce)	30

3.6.4	Permeation und Wasserstoffversprödung	31
3.6.1	Fazit zu Oberfläche, Korrosion und Versprödung	31
4	Verlegung der Rohrleitungen	32
4.1	Abgrenzung Machbarkeitsstudie	32
4.2	Grundlagen Trassenführung und Verlegung	32
4.2.1	Abstände	32
4.2.2	Grundlagen Projekt Sanierung Löschwasserleitung	33
4.2.3	Beschreibung Stilllegung Gasleitung	33
4.2.4	Leerrohrsysteme	34
4.3	Varianten für die Trassenführung	35
4.4	Variante A – Verlegung im Graben in der Erschliessungsstrasse und Nebenstrasse 3	36
4.4.1	Lösungen mit Leerrohr bei Variante A	38
4.4.2	Variante A Trassenführung im Detail	40
4.4.3	Abschnitt 1	41
4.4.4	Abschnitt 2	42
4.4.5	Abschnitt 3	43
4.4.6	Fazit Variante A	45
4.5	Variante B –Spülbohrung	46
4.5.1	Beschreibung Abschnitt A	46
4.5.2	Beschrieb Abschnitt B	48
4.5.3	Fazit Spülbohrungen	48
5	Kostenschätzung ± 25%	49
5.1	Grundlagen Kostenschätzung	49
5.2	Kosten pro Ausführungsabschnitt	50
5.2.1	Variante A Abschnitt 1; offener Graben	50
5.2.2	Variante A Abschnitt 2, offener Graben	51
5.2.3	Variante A, Abschnitt 3; offener Graben	51
5.2.4	Variante B Spülbohrung Abschnitt A	53
5.2.5	Variante B Spülbohrung Abschnitt B zum Parkplatz	53
5.2.6	Zusammenstellung und Vergleich Kosten Verbindungsleitung	54
5.2.7	Fazit Kosten	54
6	Bevorzugte Variante und Begründung	55
6.1	Zusammenfassung	55
6.2	Auswahl Anordnung der Rohrleitungsanlage	55
6.3	Auswahl des Werkstoffes für die Rohrleitung	56
6.4	Auswahl der Trassenführung:	56
6.5	Weitere Überlegungen zur ausgewählten Lösung	57
Anhang		
A	Strömungsgeschwindigkeit	
B	Ermittlung Rohrreibungszahl	
C	Dimensionierung Leitungsrohre	
D	Soluforce H2T Leitung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersichtsbild Situation Verbindungsleitung Areal A und Areal B in einem Industriegebiet	2
Abbildung 2 Überblick Aufgabenstellung Verbindungsleitung	12
Abbildung 3 Rohrleitungsanlage für den direkten Transport zwischen einer Aufbereitung auf D Beschaffenheit und einem Abnehmer (siehe H1000, Kap. 7.4.1 Abbildung 9)	14
Abbildung 4 Rohrleitungsanlage für den direkten Transport zwischen Produktion und Aufbereitung auf D Beschaffenheit beim Abnehmer	15
Abbildung 5 Projekt Sanierung Löschwasserleitung	33
Abbildung 6 Stilllegung Gasleitung in der Erschliessungsstrasse	33
Abbildung 7 Rohrdimensionen HDPE- Rohre als Leerrohre	34
Abbildung 8 Übersicht Varianten für die Verbindungsleitung	36
Abbildung 9 Übersicht Variante A	37
Abbildung 10 ELT 2 - Verlegung Wasserstoffleitung in bestehender Gasleitung (gelb)	38
Abbildung 11 ELT 2 in Abschnitt 1 Verlauf Wasserstoffleitung in violett	38
Abbildung 12 Übersichtsbild Variante A (Detail) inklusive Hindernisse	40
Abbildung 13 Abschnitt 1, Längenprofil Verlauf Wasserstoffleitung in violett	41
Abbildung 14 optionale Leitungsführung in Abschnitt 2	42
Abbildung 15 Ausschnitt für Abschnitt 3	43
Abbildung 16 Abschnitt 3 Längenprofil, braun bestehende Gasleitung, violett gestrichelt Wasserstoffleitung für späteren Einzug	43
Abbildung 17 Übersicht Spülbohrungen Abschnitt A und Abschnitt B	46
Abbildung 18 Ausschnitt Längenprofil für horizontaler Spülbohrung	47
Abbildung 19 Maximale Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Drücken (zwischen 10 und 100 bar) in Stahlleitungen für Wasserstoff (100%) und Gemische aus Wassertoff und Erdgas (C=125)	61
Abbildung 20 Maximale Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Drücken (zwischen 10 und 100 bar) in Kunststoffleitungen für Wasserstoff(100%) und Gemischen aus Wasserstoff und Erdgas; (C=200)	61
Abbildung 21 H2T - Leitung Soluforce	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht und Ergebnisse für einsetzbare Rohrmaterialien	3
Tabelle 2 Schätzung Kosten für Verlegung im offenen Graben oder mit Spülbohrung	5
Tabelle 3 Übersicht Physikalische Parameter bei Isothermen Bedingungen 15°C,	17
Tabelle 4 Grundlagen Rohrdimension, Innendurchmesser und Querschnittsfläche	18
Tabelle 5 Anhaltswerte für Strömungsgeschwindigkeit nach Cerbe Gastechnik S.178	19
Tabelle 6 Vergleich von Strömungsgeschwindigkeiten in der Rohrleitung zwischen Erdgas und Wasserstoff	19
Tabelle 7 Ermittelte Transportkapazität nach Ansatz von Mischner	20
Tabelle 8 Druckverluste bei verschiedenen Druckniveaus und Rohrdimensionen	22

Tabelle 9 Übersicht einsetzbare Werkstoffe für Rohrleitungen nach Betriebsdruck	24
Tabelle 10 Auflistung der drei untersuchten Stahlsorten mit Zuteilung zu ihren Normen für Dimension und Wandstärkenberechnung	24
Tabelle 11 Berechnete Wandstärken und Auswahl von Rohrleitungen	25
Tabelle 12 Variation Rohrdimension für nötige Transportkapazität	26
Tabelle 13 Auswahl Rohrleitungen für 750 bar und zwei Leitungen	27
Tabelle 14 Zusammenfassung Rohrleitungen in Stahl für 40 bar	28
Tabelle 15 Zusammenfassung Rohrleitungen in Stahl für 750 bar	28
Tabelle 16 Anwendung Korrosionsschutz für verschiedene Stähle	30
Tabelle 17 Kosten Verlegearbeiten für Rohre mit 40 bar Betriebsdruck im offenen Graben verlegt	49
Tabelle 18 Kosten Verlegearbeiten für Rohre mit 40 bar Betriebsdruck mit Spülbohrung	49
Tabelle 19 Übersicht grob geschätzte Kosten für Reinigung /Prüfung /Inbetriebnahme	50
Tabelle 20 Abschnitt 1 Kosten Einbau Leitungen Abschnitt 1; Trassenlänge 145 m	50
Tabelle 21 Kosten Einbau Leitungen Abschnitt 1; Trassenlänge 480 m	51
Tabelle 22 Kosten Einbau Leitungen im Graben Abschnitt 3; Trassenlänge 155 m	51
Tabelle 23 Variante B Abschnitt A; 400 m	53
Tabelle 24 Variante B, Abschnitt B, 120 m	53
Tabelle 25 Zusammenstellung Kosten für Verbindungsleitung	54
Tabelle 26 Vergleich / Übersicht verschiedener Auswahlmöglichkeiten für die Anordnung der Rohrleitung, Druck und Werkstoff	56
Tabelle 27 Ermittlung Druckverlust	64
Tabelle 28 Bemessung der Rohrleitungen und resultierende Innendurchmesser für die Bemessung nach EN 1594	65
Tabelle 29 Mindestwandstärken für Erdverlegte Leitungen	66
Tabelle 30 Bemessung der Leitungen nach EN 1594	66
Tabelle 31 Leitungsbemessung für zwei Parallele Leitungen	68

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Zeichen	Beschreibung	Einheit
f_0	Nutzungsgrad	-
z	Faktor Schweissnaht	-
Re	Reynoldszahl	-
C	Faktor Materialkonstante	$\sqrt{N/mm}$
t	Wandstärke Stahlrohr	mm
t_{min}	Mindestwandstärke Stahlrohr	mm
D_i	Rohrinnendurchmesser	mm
D_o	Rohraussendurchmesser	mm
k	Rohrrauigkeit	mm
A_i	Innere Rohrquerschnittsfläche	mm ²
f	Auslegungsspannung	MPa
Re	Elastizitätsgrenze	MPa
$R_{p0.2}$	Streckgrenze mit 0,2% plastischer Dehnung	MPa
$R_{t0.5}$	Dehngrenze bei 0,5% gesamter Dehnung	MPa
R_m	Bruchfestigkeit	MPa
p_c	Berechnungsdruck	MPa
DP	Rohrinnendruck	bar
v	Geschwindigkeit	m/s
v_{max}	maximale Geschwindigkeit	m/s
L	Rohrleitungslänge	m
P	transportierte Leistung von Wasserstoff	MW
T	Temperatur	°C, K
ρ	Dichte	kg/m ³
η	dynamische Viskosität	Pa·s
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
λ	Rohrreibezahl	-
$\lambda_{üb}$	Rohrreibezahl Übergangsbereich	-
λ_{alr}	Rohrreibezahl Turbulenzbereich	-
λ_{gl}	Rohrreibezahl Glattnrohr	-
ω_m	massenspezifische Energiedichte	kW/kg
ω_v	volumenspezifische Energiedichte	kW/m ³

Abkürzung	Beschreibung
MOP	Maximaler Betriebsdruck
ELT	Energie- und Leitungstunnel
SQ	Schienenquerung
H2T	Kunststoffverbundrohr aus RTP von Soluforce
RTP	Reinforced Thermoplastic Pipe

Normenverzeichnis! → ist hinten angefügt

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

1.1 Ausgangslage

Diese Machbarkeitsstudie entsteht als Beilage zur Empfehlung H1000.

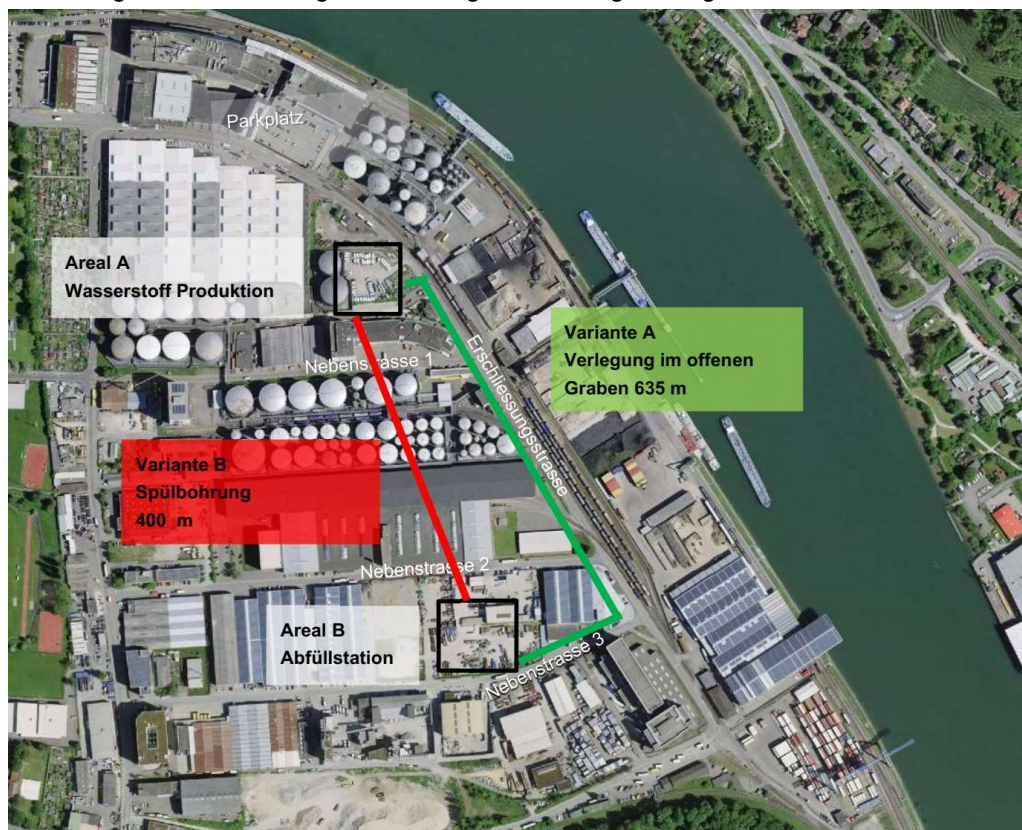
Für die IWB wird der Bau einer Wasserstoffleitung in einem Industriegebiet untersucht. Mit dieser Machbarkeitsstudie wird aufgezeigt, wie das Regelwerk "Empfehlung H1000" angewendet werden kann.

1.2 Aufgabenstellung

1.2.1 Allgemein

Auf einem Industrieareal soll die Machbarkeit für eine Wasserstoff-Verbindungsleitung ab einer möglichen Wasserstoffproduktion zu einer Abfüllstation/Tankstelle untersucht werden.

Abbildung 2 Überblick Aufgabenstellung Verbindungsleitung



1.2.2 Technische Anforderungen an die Verbindungsleitung

Transportleistung	30 MW
Untersuchte Druckniveaus	40 bar, 750 bar, 1'000 bar
Beschaffenheit Wasserstoff	Gruppe D für Abfüllstation/Tankstelle Gruppe A für mögliche weiter Anschlüsse

1.2.3 Ziele

- Erstellung der Machbarkeitsstudie mit Anwendung des Regelwerk SVGW Empfehlung H1000
- Rohrleitungsdimensionierung für die gewünschte Transportleistung von 30 MW in den Druckstufen 40 bar, 750 bar und 1'000 bar
- Bestimmung der möglichen Rohrleitungswerkstoffe für die Wasserstoffleitung
- Ermittlung der nötigen Wandstärken und ggf. Auswahl der Rohrdimensionen
- Abklärung der einzuhaltenden Abstände zu Gewerken und zur Eisenbahn.
- Abklärung und grobe Darstellung der Trassenführung.
- Vergleich der einzelnen Varianten aufzeigen. Darstellung eines Überblicks der Leitungsführung und, wo nötig, Darstellung der Details für zwei Varianten:

Variante A

Erdverlegter Grabenbau der Wasserstoffleitung in der Erschliessungsstrasse- und Nebenstrasse 3

- Synergien mit dem Projekt "Sanierung Löschwasserleitung" prüfen
- Leerrohrsysteme prüfen
- Verlegung der Wasserstoffleitung prüfen
- Eventuell Optimierung der Leitungsführung
- Ggf. Miteinbringung von aktivem oder passivem Korrosionsschutz

Variante B

Direkte Verbindungsleitung als Spülbohrung

1.2.4 Abgrenzung der Aufgabe

Die vorliegende Machbarkeitsstudie ist eine Konzeptstudie zur Auslegung und Trassierung einer Wasserstoffleitung. Sie hält sich an die Empfehlung H1000. Eine projektspezifische Risikoanalyse wurde nicht durchgeführt.

1.2.5 Basisdokumente

- Empfehlung H1000
- Planunterlagen zum Projekt Sanierung der Löschwasserleitung.
- Katasterplan Hafengelände
- Aufgabenstellung

2 Anordnung der Rohrleitungen und Wasserstoffaufbereitungsanlage

Grundlagen sind in H1000, Kapitel 7.3 und 7.4 zu finden.

Angaben zur Beschaffenheit von Wasserstoff finden sich in ISO 14687 und in der SVGW Richtlinie G18d 2022.

2.1 Projektaufgabe Verbindungsleitung zu einem Abnehmer für Mobilität

Am Abnehmer (Abfüllstation, Tankstelle), ist eine Wasserstoffbeschaffenheit nach Gruppe D gefordert. Für die Anordnung der Rohrleitung und Wasserstoffaufbereitung können generell folgende beiden Anordnungen geprüft werden.

2.1.1 Vorbemerkung

Mit Aufbereitung wird im Folgenden die Aufbereitung auf benötigte Beschaffenheit (Gruppe D) und Druck (750 bar in der Verbindungsleitung) für die Anwendung bezeichnet. Es wird angenommen, dass Beschaffenheit und Druck gemeinsam entweder bei der Produktion oder bei der Anwendung (Abnehmer) platziert sind. Eine getrennte Aufstellung der Aufbereitung ist möglich; wird jedoch nicht betrachtet, da das Druckniveau die entscheidende Grösse für die Auslegung der Rohrleitungsanlage ist.

2.1.2 Anordnung 1: Aufbereitung bei der Produktion, Rohrleitungsanlage mit hohem Druck.

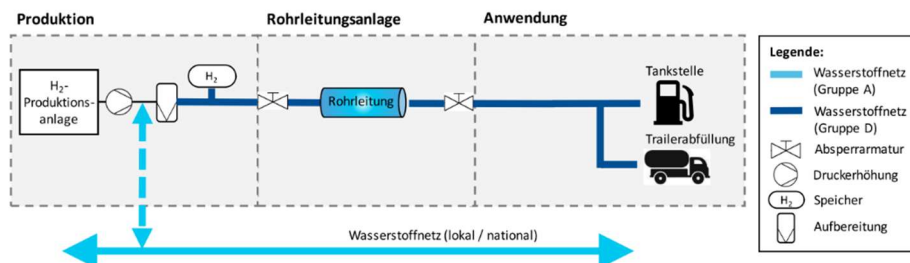


Abbildung 3 Rohrleitungsanlage für den direkten Transport zwischen einer Aufbereitung auf D Beschaffenheit und einem Abnehmer (siehe H1000, Kap. 7.4.1 Abbildung 9)

Die Aufbereitung des Wasserstoffs bezüglich Beschaffenheit (Gruppe D) und Druck (für Tankstelle) erfolgt zentral bei der Wasserstoffproduktion. Die Rohrleitungsanlage wird mit hohem Druck betrieben (hier 750 bar oder 1000 bar).

Wasserstoff aus anderen Quellen als der Produktion muss vor der Aufbereitung am Standort der Produktion eingespeist werden.

2.1.3 Anordnung 2: Aufbereitung beim Abnehmer, Rohrleitungsanlage auf dem Druckniveau der Elektrolyse

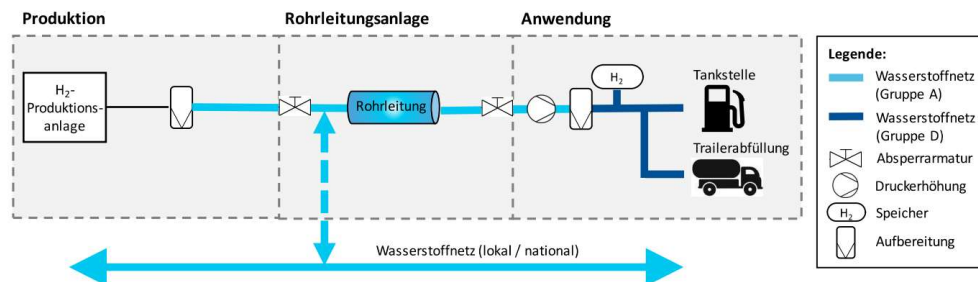


Abbildung 4 Rohrleitungsanlage für den direkten Transport zwischen Produktion und Aufbereitung auf D Beschaffenheit beim Abnehmer

Die Aufbereitung des Wasserstoffs bezüglich Beschaffenheit (D) und Druck (für Tankstelle) erfolgt beim Abnehmer (Verbraucher).

Die Rohrleitungsanlage kann bei dieser Anordnung auf eine Wasserstoffbeschaffenheit (Gruppe A) eingerichtet werden. Wasserstoff aus anderen Quellen, z. B. aus einem später vorhandenen Wasserstoffnetz kann bei der Produktion oder beim Verbraucher (vor der Aufbereitung) eingespeist werden.

Das Druck Niveau des Wasserstoffs in der Rohrleitungsanlage (Verbindungsleitung) wird vom Ausgangsdruck der Elektrolyse (z.B. 40 bar) bestimmt.

2.1.4 Erweiterte Projektaufgabe

Die hier zu behandelnde Aufgabe beinhalten die Untersuchung einer Verbindungsleitung. Die Mitbenutzung der Leitung zur Versorgung von weiteren Abnehmern im Industriegebiet kann erwartet werden. Eine Anordnung der Aufbereitung gemäss Anordnung 2 bietet für einen solchen Ausbaufall den Vorteil, dass bei den Abnehmern jeweils lokal auf die entsprechende Wasserstoffqualität aufbereitet werden kann.

2.2 Auswahl Anordnung 1 oder Anordnung 2

Aussagen zur Priorisierung von Anordnung 1 oder 2 können erst nach Evaluation der Rohrleitungsdimensionen im nächsten Kapitel erfolgen.

Bisherige Vorteile für Anordnung 2 sind tiefere Anforderung bezüglich Beschaffenheit sowie die mögliche Flexibilität für Ausbauten.

3 Auslegung der Rohrleitung

Für die Auslegung der Rohrleitung wird folgende Methodik gewählt:

1. Festlegen von Grundlagen und Anforderungen (siehe Kapitel 3 + 4.1)
2. Vorauswahl der Rohrdimension
3. Ermitteln der Wandstärke
4. Anpassen der Rohrdimension auf Grund der ermittelten Wandstärke
5. Festlegen der gewählten Rohrdimension

3.1 Auswahl des Druckniveaus für die Wasserstofftransportleitung zum Einsatz in der Mobilität

Die geplante Verbindungsleitung soll eine Tankstelle versorgen. Es wird entsprechend Wasserstoff für die Anwendung in der Mobilität gefordert.

Folgende Druckniveaus wurden definiert:

- **40 bar Leitung**
Elektrolyseure sind mit bis zu 40 bar Ausgangsdruck des Wasserstoffes erhältlich. Deshalb wird dieser Druck als Variante für die Verbindungsleitung angesetzt.
- **750 bar oder 1'000 bar Leitung**
Wasserstofftanks in Fahrzeugen benötigen ein hohes Druckniveau in diesem Fall wird mit 700 bar in den Tanks gerechnet. Deshalb wird als Alternative eine 750 bar Leitung ab Wasserstoffproduktion untersucht.

Hinweise zu den Regelwerken

Für Wasserstoff bestehen im Detail noch keine Regelwerke für Rohrleitungsanlagen. Der Blick in die Regelwerke für Erdgas ist daher naheliegend. Werden die gängigen Regeln für den Bau und die Beurteilung von Erdgasleitungen angewendet, würden folgende Grenzen für die Unterstellung unter das Eidgenössische Rohrleitungsinspektorat (ERI) gelten:

- Grösser gleich 5bar
- Aussendurchmesser kleiner 6 cm

Eine Unterstellung unter die Regelwerke der ERI würde aber auf Grund der dort angegebenen weiteren Regeln (z.B. Abstände – keine Hochdruckleitungen in Strassen und ähnliches) dazu führen, dass in bebautem Gebiet keine Wasserstoffrohrleitungen mit oben gewählten Druckniveaus erstellt werden können.

Diese Machbarkeitsstudie befasst sich mit der Möglichkeit der technischen Ausführung der Leitungen. Der regulatorische Rahmen wird nicht behandelt. Es wird mit den oben definierten Druckniveaus weitergearbeitet.

3.2 Grundlagen für die Auswahl der Rohrdimension

Für die Auswahl der Rohrdimension müssen durch den Betreiber mindestens folgende Parameter festgelegt werden.:

Thema	Auftrag Machbarkeitsstudie
Anordnung der Rohrleitung	voraussichtlich Variante 2, Kapitel 2
Verwendung der Leitung	Verbindungsleitung
gewünschte Transportleistung	30 MW oder 10'000 Nm ³ /h
Druckniveau	40 bar / 750 bar / 1000 bar
tolerierbarer Druckverlust in der Leitung	4-5 bar (bis Ende Leitung)
Lastwechsel	zu definieren
Leitungslänge	625 m (Grabenbau)
Lastwechsel	vorwiegend ruhende Beanspruchung
Tolerierbarer Druckverlust pro Meter	bis 8 mbar/m (5 bar / 625 m)

Tabelle 3 Übersicht Physikalische Parameter bei Isothermen Bedingungen 15°C,
Berechnete Werte; Betriebsvolumenströmen für 30 MW Transportkapazität

Druck	Betriebsvolumenstrom	Dyn. Viskosität	Dichte
40 bar	274 m ³ /h	$8.73 \cdot 10^{-6}$ Pa s	3.288 kg/m ³
750 bar	21.4 m ³ /h	$1.12 \cdot 10^{-5}$ Pa s	42.09 kg/m ³
ca. 1000 bar	17.9 m ³ /h	$1.22 \cdot 10^{-5}$ Pa s	50.42 kg/m ³

3.3 Verwendung der Leitung und tolerierter Druckverlust

Die Leitung kann folgendermassen verwendet werden:

a. **Verbindungsleitung**

Die geplante Leitung ist eine Verbindungsleitung zu einem oder mehreren Verbrauchern mit eigener Aufbereitung (Kompressor/Reinigung). Daraus folgt:

Hohe Druckverluste sind zulässig.

Kleine Rohrdimensionen können gewählt werden.

b. **Rohrleitung in einer lokalen oder nationalen Wasserstoffinfrastruktur**

Die Leitung soll später als Abschnitt in einem grösseren Wasserstoffversorgungsnetz eingebunden werden. Daraus folgt:

Druckverluste müssen möglichst klein sein und die Rohrdimensionen werden dementsprechend grösser.

Die Aufgabenstellung besteht darin, eine Verbindungsleitung zu bauen, folglich können hohe Druckverluste zugelassen werden.

3.4 Vorauswahl der Rohrdimension

Für die statische Bemessung der Rohrleitung (Wandstärkenberechnung) ist vorgängig eine Vorauswahl der Rohrdimension nötig. Dazu sind Angaben zur nötigen Transportkapazität, zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten und Rohrrinnenquerschnitte nötig. Für die Vorauswahl der Rohrleitungen werden die Dimensionen von handelsüblichen Stahlrohren betrachtet.

Tabelle 4 Grundlagen Rohrdimension, Innendurchmesser und Querschnittsfläche

DN	Dimension	d _i	d _a	Ws	A _i
		[mm]	[mm]	[mm]	[m ²]
10	3/8"	12.6	17.2	2.30	0.00012
15	1/2"	16.1	21.3	2.60	0.00020
20	3/4"	21.7	26.9	2.60	0.00037
25	1"	27.3	33.7	3.20	0.00059
32	5/4"	36.0	42.4	3.20	0.00102
40	48,3 x 2,6	41.9	48.3	3.20	0.00138
50	60,3 x 2,9	53.1	60.3	3.60	0.00221
65	76,1 x 2,9	68.9	76.1	3.60	0.00373
80	88,9 x 3,2	80.9	88.9	4.00	0.00514
100	114,3 x 3,6	105.3	114.3	4.50	0.00871
125	139,7 x 4	129.7	139.7	5.00	0.01321
150	168,3 x 4,5	155.1	165.1	5.00	0.01889
200	219,1 x 6,3	206.5	219.1	6.35	0.03349
250	273,0 x 6,3	260.4	273.0	6.35	0.05326
300	323,9 x 7,1	309.7	323.9	6.35	0.07533

3.4.1 Grundlagen Transportleistung

Die Transportleistung P ist das Produkt aus Volumenstrom $\dot{V}$ und die volumenspezifischer Energiedichte ω_v .

$$P = \dot{V} \omega_v \quad [1]$$

Der Volumenstrom $\dot{V}$ ist das Produkt aus mittlerer Geschwindigkeit v und Rohrrinnenquerschnittsfläche A_i .

$$\dot{V} = v A_i \quad [2]$$

$$P = v A_i \omega_v \quad [3]$$

3.4.2 Ansatz mittels der Strömungsgeschwindigkeit

Für die Anwendung von Formel Nr. [3] ist ein Wert für die Strömungsgeschwindigkeit gesucht. Die Energiedichte wird aus den physikalischen Bedingungen ermittelt, die Rohrdimensionen werden gemäss Tabelle 4 gewählt.

Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten aus Literaturwerten

Aus Theorie und Praxis (Quelle: Cerbe Gastechnik, S.178, Tabelle 4.8) sind für Strömungsgeschwindigkeiten bei Erdgas (Methan) Transport- und Verteilleitungen folgende Werte bekannt:

Tabelle 5 Anhaltswerte für Strömungsgeschwindigkeit nach Cerbe Gastechnik S.178

Druckbereich			ND		MD	HD	
Überdruck	p_e	bar	$\leq 0,03$	$>0,03 \dots 0,1$	$>0,1 \dots 1$	$>1 \dots 16$	$40 \dots 70$
Nennweiten	DN		$50 \dots 600$	$50 \dots 600$	$100 \dots 400$	$300 \dots 600$	$400 \dots 900$
Integrale Rauigkeit	k_i	mm	$0,5 \dots 3,0$	$0,5 \dots 3,0$	$0,1 \dots 0,5$	$0,1 \dots 0,5$	$0,1$
Verfügbares Druckgefälle	$\frac{\Delta p}{L}$	$\frac{\text{mbar}}{\text{km}}$	$0,5 \dots 1,5$	$1,0 \dots 1,5$	–	–	–
	$\frac{p_1^2 - p_2^2}{L}$	$\frac{\text{bar}^2}{\text{km}}$	–	–	$\leq 0,03$	≤ 5	≤ 30
Rohrreibungszahl	λ		$0,05 \dots 0,02$	$0,04 \dots 0,017$	$0,038 \dots 0,016$	$0,021 \dots 0,015$	$0,010 \dots 0,008$
Strömungsgeschwindigkeit	w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$0,5 \dots 3,5$	$1 \dots 10$	$7 \dots 18$	≤ 20	≤ 20

Weiter ist aus der Literatur z.B. Leitfaden, Kapitel 4.2. bekannt, dass die Durchflussmenge von H₂ bei gleichem Druckverlust, dreimal so gross sein kann wie bei Erdgas. Demnach kann auch die Strömungsgeschwindigkeit von H₂ dreimal so gross sein wie Erdgas. Siehe H 1000, Kap. 4.3.

Tabelle 6 Vergleich von Strömungsgeschwindigkeiten in der Rohrleitung zwischen Erdgas und Wasserstoff

Quelle	Erdgas	Wasserstoff
Cerbe G.	20 m/s	
Faktor 3 zu Erdgas gemäss H1000, Kap.3.4 bzw. Huinen [L4]		60 m/s (3x Erdgas)

Dieser Ansatz berücksichtigt folgende Aspekte nicht oder ungenügend:

- Bei kleinen Rohrdimensionen ergeben sich bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit grössere Druckverluste wie bei grossen Rohrdimensionen
- Angaben für Erdgasverbindungs- oder Transportleitungen sind bei Cerbe nur für Drücke bis etwa 70 bar publiziert.
- Die Zunahme der Dichte bei hohen Drücken, sowie deren Abweichung zum Verhalten eines idealen Gases (Realgasfaktor) oder zum Erdgas wird nicht berücksichtigt.

Fazit nach Ansatz Strömungsgeschwindigkeit aus Literaturwerten

Der Ansatz, über Literatur und Praxiswerte für Erdgas und dreifacher Strömungsgeschwindigkeit Rohrdimensionen zu ermitteln, eignet sich für neu zu erstellende Leitungen nicht. Im Resultat fehlen dabei Angaben zum Druckverlust in der Leitung.

Für die Beurteilung der Transportkapazität von bestehenden Erdgasleitungen, welche auf Wasserstoff umgerüstet werden, scheint der Ansatz mit dreifacher Durchflussmenge sinnvoll. Dies gilt, wenn nach Umrüstung das Druckniveau in der Leitung beibehalten wird.

Ermitteln der Strömungsgeschwindigkeit nach Fachbericht von Mischner

Mischner führt alternativ eine einfache Formel in Funktion des Rohrleitungswerkstoffs (C-Wert für Werkstoff) und der Dichte ein. Hierbei wird die maximale Strömungsgeschwindigkeit ermittelt:

$$v_{max} = \frac{C}{\sqrt{\rho}} \cdot 0.5$$

Detaillierte Ausführungen dazu siehe Anhang A.

Über die Anwendung der Formel von Mischner können folgende Geschwindigkeiten ermittelt werden:

- 40 bar 34.4 m/s
- 750 bar 9.63 m/s
- 1000 bar 8.8 m/s

Tabelle 7 Ermittelte Transportkapazität nach Ansatz von Mischner

Nennweite SN EN 10255	Rohrinnen- durchmesser [mm]	Transportleistung P in kW Stahlrohr C = 125 (P > 30 MW ist grün)			Transportleistung P in kW Kunststoffrohr C = 200 (P > 30 MW ist grün)
DN	D _i	40 bar	750 bar	1000 bar	40 bar
10	12.6	1'712	6'074	6'639	2'739
15	16.1	2'805	9'951	10'877	4'487
20	21.7	5'111	18'136	19'823	8'178
25	27.3	8'105	28'758	31'434	12'968
32	36	14'120	50'097	54'759	22'591
40	41.9	19'142	67'917	74'236	30'627
50	53.1	30'774	109'188	119'348	49'238
65	68.9	51'857	183'993	201'114	82'971
80	80.9	71'524	253'774	277'388	114'439

Dieser Ansatz berücksichtigt folgende Aspekte nicht oder ungenügend:

- Bei kleine Rohrdimensionen ergeben sich bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit grössere Druckverluste als bei grossen Rohrdimensionen
- Der C-Wert in der Formel ist mit 200 für Kunststoffleitungen und 125 für Stahlleitungen sehr allgemein gesetzt.
- Die Methode liefert keine Angaben zum Druckverlust, also kann nicht beurteilt werden, ob eine neue Leitung anschliessend für die Anwendung passt.

Fazit aus Vorauswahl Rohrdimension mit Strömungsgeschwindigkeit

Eine Auswahl der Rohrleitungsdimension über den Ansatz der Geschwindigkeiten führt zu einem Teilergebnis. Da der Druckverlust einer Leitung dabei nicht beurteilt werden kann ist dieser Ansatz nicht zu empfehlen. Er gibt aber Anhaltspunkt in welchem Bereich sich die Geschwindigkeiten bewegen können.

Der Ansatz mit der, gegenüber dem Gasnetz 3-fach höheren Durchflussmenge für Wasserstoff gegenüber Erdgas (Methan) eignet sich für die Umwidmung von Leitungen. Für neue Leitungen ist ein Ansatz mit Berechnung des resultierenden Druckverlusts zu wählen.

3.4.3 Ansatz über den Druckverlust

Die Transportleistung P ist das Produkt aus Volumenstrom $\dot{V}$ und die volumenspezifischer Energiedichte ω_v .

$$P = \dot{V} \omega_v \quad [1]$$

Der Volumenstrom $\dot{V}$ ist der Quotient aus Transportleistung P und Energiedichte ω_v

$$\dot{V} = \frac{P}{\omega_v} \quad [4]$$

Die Geschwindigkeit v ist der Quotient von Volumenstrom $\dot{V}$ und Rohrrinnenquerschnittsfläche A_i

$$v = \frac{\dot{V}}{A_i} = \frac{P}{\omega_v A_i} \quad [5]$$

Über diese Grundlage für die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich für jeden Rohrrinnendurchmesser eine andere Strömungsgeschwindigkeit.

Im nächsten Schritt kann dann der Druckverlust als Anhaltswert ermittelt werden.

Für den Druckverlust Δp kann über folgende Formel in Funktion der Länge (L ; des Rohrrinnendurchmessers (D_i), der Dichte, der Geschwindigkeit und des λ -Werts ermittelt werden.

$$\Delta p = \frac{L}{D_i} \frac{\rho}{2} v^2 \lambda \quad [6]$$

- Ermittlung von λ siehe Ausführungen im Anhang
- Für die Dichte ist hier die Dichte des Mediums bei Betriebsbedingungen einzusetzen

In Tabelle 8 werden Druckverluste in mbar/m für den Transport von 30 MW Wasserstoff für unterschiedlichen Rohrquerschnittsflächen berechnet.

Bei Vorgabe von maximal 8 mbar/m (siehe Kapitel 3.1) können in der Tabelle 8 grün markierte Rohrdimensionen eingesetzt werden.

Tabelle 8 Druckverluste bei verschiedenen Druckniveaus und Rohrdimensionen

Wasserstoff T = 15 °C kompressibles Medium					
Druck p	Volumenstrom $\dot{V}$ (30 MW)	DN	D_i	Geschwindigkeit v	Druckverlust Δp
[bar]	[m ³ /h]	-	mm	[m/s]	[mbar/m]
40	274.0	20	21.7	207.71	466.318
		25	37.3	130.99	154.216
		32	36	75.19	40.701
		40	41.9	55.46	19.607
		50	53.1	34.5	6.274
		65	68.9	20.47	1.793
		80	80.9	14.84	0.829
		100	105.3	8.74	0.232
750	21.41	20	21.7	16.23	38.264
		25	27.3	10.23	12.654
		32	36	5.87	3.340
		40	41.9	4.33	1.609
		50	53.1	2.70	0.515
		65	68.9	1.60	0.147
		80	80.9	1.16	0.068
		100	105.3	0.68	0.019
ca. 1000	17.87	20	21.7	13.55	32.522
		25	27.3	8.54	10.755
		32	36	4.90	2.839
		40	41.9	3.62	1.367
		50	53.1	2.25	0.438
		65	68.9	1.34	0.125

		80	80.9	0.97	0.058
		100	105.3	0.57	0.016

Bemerkung zur Vordimensionierung der Leitung und zum sich in der Praxis einstellenden Druckverlust

Die oben aufgeführte Tabelle 8 mit Angaben zum relativen Druckverlust ist hier zwecks Vorauswahl der Rohrleitung mit einer "nicht raumverändernden Strömung" gerechnet (d.h. unter der Annahme, dass der Druck und somit die Dichte des Mediums über den Leitungsabschnitt konstant bleiben). Zur Vorauswahl der Rohrleitungsdimension als Grundlage für die Bemessung der Leitungen ist dies ausreichend.

Zur Festlegung des effektiv sich einstellenden Druckverlusts in einer geplanten Leitung muss nach der Dimensionierung der Wandstärken, nach Auswahl der Rohrleitungen und nach Festlegung der Einzelwiderstände im Rohr eine Druckverlustberechnung mit raumveränderlicher Strömung durchgeführt werden. Dies ist in einem nächsten Projektschritt zu empfehlen.

3.4.4 Zwischenfazit Vorauswahl Rohrdimension und Druckniveau

Aus Tabelle 6 geht hervor, dass eine Erhöhung des Drucks von 750 bar auf 1000 bar nicht zum Einsatz einer Rohrleitung mit kleinerer Dimension führt.

Dieser Umstand sowie die Erkenntnis, dass das Druckniveau 1000 bar für unsere Anwendung nicht benötigt wird, führt dazu, dass die Betrachtung mit 1000 bar nicht weiterverfolgt wird.

3.4.5 Innendurchmesser für 8 mbar/m bei 30 MW Transportleistung

Für die vorgegebene Transportleistung (30 MW) und die vorgegebene Druckdifferenz von maximal 8 mbar/m kann in Abhängigkeit zum Druckniveau der mindestens notwendige Innendurchmesser wie folgt festgelegt werden:

40bar = 50 mm Innendurchmesser

750 bar = 30 mm Innendurchmesser

3.5 Rohrdimensionen und Werkstoffe

3.5.1 Werkstoffe für Rohrleitungen

Für die geplante Anwendung sind Rohrleitungen aus nachfolgenden Werkstoffen möglich (siehe Empfehlung H1000, Kapitel 8.2.2 und 8.2.3.).

Tabelle 9 Übersicht einsetzbare Werkstoffe für Rohrleitungen nach Betriebsdruck

Druck [bar]	Polyethylen		Polyamid	Metall- Kunststoffver- bundrohr (RTP)	Stähle für Grossrohre (C-Stähle)	Nichtrostende Stähle, Nicht-Eisen-Metalle
	Einschicht	Mehrschicht				
40						
750						

Rot → Material ist für diese Anwendung nicht geeignet

Grün → Material ist für diese Anwendung geeignet

Rohre aus Nichteisenmetallen werden nicht untersucht.

3.5.2 Auswahl Stahlwerkstoffe für Rohrleitungen

Für weitere Untersuchungen werden Stähle aus der Kategorie C-Stähle und Nichtrostende Stähle untersucht. Folgende Stahlsorten werden für diese Anwendung untersucht und die Wandstärkenberechnung durchgeführt.

Tabelle 10 Auflistung der drei untersuchten Stahlsorten mit Zuteilung zu ihren Normen für Dimension und Wandstärkenberechnung

Stahlsorte mit Werkstoffnummer	Norm für Rohrleitungsdimensionen	Norm für Wandstärkenberechnung	Zur Untersuchung ausgewählt, weil:
L290NE (1.0484), L415NE (1.8972)	SN EN ISO 3183:2020-02	prEN 1594:2022	In H1000 empfohlen
P235TR1 (1.0254), P355N (1.0562)	SN EN 10217-1	prEN 1594:2022	unlegierter Qualitätsstahl aus dem Druckbehälterbau
X2CrNiMo17-12-2 (1.4404)	SN EN 10216-5 SN EN 10220-1	SN-EN 13480-3	Legierter, nichtrostender (austenitischer) Edelstahl

Rohrleitungen aus L290 NE oder L415 NE werden üblicherweise erst ab der Dimension DN 100 und grösser angeboten. (siehe z.B. Mannesmann Linepipe – Lieferprogramm). Diese beiden Werkstoffe kommen in Tabelle 10 vor, weil diese in der H1000 als mögliche Stahlsorten erwähnt werden. Da in unserem Falle eine Dimension von DN 50 ausreicht, werden die Rohrleitungen aus L290 NE und L415 NE nicht weiter betrachtet.

3.5.3 Berechnung der Wandstärke

Die Berechnung der Wandstärke erfolgt nach prEN1594 Kapitel 7.2.1. Darüber hinaus kann eine bruchmechanische Bewertung des Stahlrohrs verlangt werden. Diese ist, gemäss prEN 1594:2022, Anhang B, jedoch nicht notwendig, wenn folgende drei Kriterien zugleich erfüllt sind:

1. Vorwiegend ruhende Beanspruchung vorliegt und
2. der Werkstoff eine Mindeststreckgrenze ≤ 360 MPa aufweist und
3. der Nutzungsgrad (Faktor bei der Wanddicken- oder Druckberechnung)
 $f_0 \leq 0.5$ ist

Von einer vorwiegend ruhenden Beanspruchung kann gemäss Grundlage aus Kapitel 0 ausgegangen werden. Die jeweilige Streckgrenze der beiden Druckbehälterstähle P235 TR1 und P355 N sowie des rostfreien Edelstahls X2CrNiMo17-12-2 liegt unterhalb 360 MPa. Wählt man einen Sicherheitsfaktor bei der Wandstärkenermittlung von $S=2$ entspricht dies einem Nutzungsgrad von $f_0 = 0.5$. Dann kann eine bruchmechanische Bewertung nach prEN 1594:2022 entfallen.

Die Berechnung der Wandstärken findet sich im Anhang B im Detail und erfolgt pro Stahlsorte mit den in Tabelle 10 genannten Normen. Ausführliche Darstellung siehe Anhang.

Nach der Wandstärkenberechnung wird geprüft, ob weitere Minimalanforderungen wie zum Beispiel minimale Wandstärken für erdverlegte Leitungen, bestehen. Anschliessend wird im normierten Rohrangebot nach der nächstgrösseren verfügbaren Wandstärke gesucht und das entsprechende Rohr ausgewählt.

Tabelle 11 Berechnete Wandstärken und Auswahl von Rohrleitungen

Werkstoff	Druck [bar]	DN	Aussen-durchmesser D_o [mm]	Wandstärke / berechnet [mm]	Wandstärke gewählt nach Norm [mm]	Innen-durchmesser D_i [mm]
P235 TR1	40	50	60.3	1.1 ¹⁾	3.2*	53.9
P355 N	40	50	60.3	0.7 ¹⁾	3.2*	53.9
X2CrNiMo17-12	40	50	60.3	1.1 ²⁾	3.6**	53.1
P235 TR1	750	32	42.4	13.5 ¹⁾	kein passendes Produkt	
P355 N	750	32	42.4	9 ¹⁾	10 ³⁾	22.4
X2CrNiMo17-12	750	32	42.4	11.2 ²⁾	kein passendes Produkt	20

¹⁾prEN 1594:2022 ²⁾ EN 13480-3:2017 ³⁾ SN EN 10220:2003

*Mindestwandstärke für erdverlegte Leitungen gemäss SN EN ISO 13480-6 2017 3.2 mm bis DN 80, 4.7 mm bis DN 150, 6.35 mm bis DN 450, nächstgrössere Wandstärke gewählt

**Auswahl aus Katalog Kohler AG (DN 50, 40S)

Fazit aus Tabelle 11

40 bar -

Für 40 bar können Leitungen aus den üblichen Rohrtabellen verwendet werden. Zum Beispiel Tabelle

6 aus DIN EN 10217-1. Die berechnete Wandstärke muss auf die vorgegebene Mindestwandstärke nach SN EN ISO 13480-6 2017 aufgerundet werden.

750 bar

Bei Einsatz des Werkstoffes P235 TR1 ergeben sich für 750 bar grosse Wandstärken. Deshalb wird für weitere Betrachtungen ein höherfestes Material (P355 N) eingesetzt.

3.5.4 Auswahl der Rohrleitungen für 750 bar

Um die für unser Beispiel gewünschte Transportkapazität zu gewährleisten, muss nach Kapitel 3.4.5 ein Innendurchmesser von 30 mm für 750 bar gewährleistet sein. Dies ist in der Auswahl aus Tabelle 11 nicht gegeben. Daher wurden in Tabelle 12 die nächsten passenden Rohrnennweiten und Wandstärken für einen ausreichenden Innendurchmesser evaluiert.

Tabelle 12 Variation Rohrdimension für nötige Transportkapazität

Werkstoff	Druck [bar]	DN	Aussen-durchmesser D_o [mm]	Wandstärke / berechnet [mm]	Wandstärke gewählt nach Norm [mm]	Innen-durchmesser D_i [mm]
P355 N	750	50	60.3	12.7 ¹⁾	14.2 ¹⁾	31.9
X2CrNiMo17-12-2 1.4404	750	65	76.1	22.5	Kein Produkt im Standard verfügbar	31.1

Fazit: Für den Qualitätsstahl P355 N gibt es ein Rohr in DN 50, was bei der berechneten Wandstärke den minimal notwendigen Innendurchmesser erfüllt. Beim Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 wird dies bei DN 65 nicht erfüllt.

3.5.5 Option zwei parallele Rohrleitungen für 750 bar

Um dickwandige Rohrleitungen wie vorher ausgelegt zu vermeiden, können alternativ zwei parallele Rohrleitungen für 750 bar verlegt werden.

Jede der beiden Rohrleitung muss hierfür mit einem Innendurchmesser von mindestens $D_i = 21.2$ mm. ausgewählt werden. So kann Transportkapazität von 30 MW mit zwei Leitungen erfüllt werden.

Tabelle 13 Auswahl Rohrleitungen für 750 bar und zwei Leitungen

Werkstoff	Druck [bar]	DN	Aussen-durchmesser D_o [mm]	Wandstärke / berechnet [mm]	Wandstärke gewählt nach Norm [mm]	Innen-durchmesser D_i [mm]
P355 N	750	32	42.4	9 ¹⁾	10	22.4
X2CrNiMo17-12-2 1.4404	750	50	60.3	17.8	Kein Produkt im Standardsortiment verfügbar	24.7

Fazit: Für den Qualitätsstahl P355 N gibt es ein Rohr in DN 32, was bei der berechneten Wandstärke den minimal notwendigen Innendurchmesser erfüllt. Beim Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 ist für DN 50 kein Rohr im Standardsortiment verfügbar welches die Anforderungen erfüllt.

3.5.6 Zusammenstellung und Vergleich der ausgewählten Rohrleitungen aus Stahl mit Kostenübersicht

Die oben gemachten Untersuchungen führen zu folgenden für unsere Anwendung einsetzbaren Rohrleitungen und Dimensionen:

Tabelle 14 Zusammenfassung Rohrleitungen in Stahl für 40 bar

Werkstoff	Druck [bar]	DN	Aussen-durchmesser D_o [mm]	Wandstärke / berechnet [mm]	Wandstärke gewählt nach Norm [mm]	Innen-durchmesser D_i [mm]	Kosten / m [CHF]
P235 TR1	40	50	60.3	1.1	3.2	53.9	17.64*
P355 N	40	50	60.3	0.7	3.2	53.9	18.83*
X2CrNiMo17-12-2 1.4404	40	50	60.3	1.1	3.6	53.1	30.44*

Tabelle 15 Zusammenfassung Rohrleitungen in Stahl für 750 bar

Werkstoff	Druck [bar]	DN	Aussen-durchmesser D_o [mm]	Wandstärke / berechnet [mm]	Wandstärke gewählt nach Norm [mm]	Innen-durchmesser D_i [mm]	Kosten / m [CHF]
P355 N	750	50	60.3	12.7	14.2	31.9	54.43*
X2CrNiMo17-12-2 1.4404	750	65	76.1	22.5	Kein Produkt im Standard verfügbar	31.1	k.A.
Ausführung mit zwei parallelen Leitungen aus Stahl							
P355 N	750	32	42.4	9	10	22.4	28.60*

*spezifische Meterpreise für das Rohrmaterial nach Angaben von Kindlimann AG, auf Anfrage (www.kindlimann.ch)

3.5.7 Fazit Auslegung Rohrleitungen aus Stahl und Systemdruck

Im vorliegenden Fall (siehe oben) ist es vorteilhaft das System mit 40 bar zu betreiben. Bei gegebener Transportkapazität von 30 MW werden die Rohrleitungsdimensionen für den Betrieb mit 750 bar nicht kleiner. Es müssen aber Rohrleitungen mit grösserer Wandstärke eingebaut werden, wodurch die Kosten steigen.

Weiterhin wurde geprüft, ob es Vorteile bringt die Transportleistung auf zwei Leitungen aufzuteilen. Es können Rohrleitungen mit geringerer Wandstärke und kleinerer Dimension eingesetzt werden. Es müssen jedoch doppelt so viele Leitungsmeter verbaut werden und der Leitungsgraben muss etwas breiter ausgehoben werden. Die Kosten für zwei parallele Leitungen werden am Ende höher. Ausser zum Zweck der sicheren Versorgung (Redundanz) bringt eine doppelte Leitungsführung in unserem Beispiel keinen Vorteil.

3.5.8 Rohre aus (Metall-)Kunststoffverbundwerkstoffen (RTP)

Das H2T-Rohr von Soluforce besteht aus faserverstärktem Thermoplast (RTP "Reinforced Thermoplastic Pipes") und ist speziell für eine Wasserstofftransportleitung konzipiert. Die flexiblen Rohrleitungen sind bis 42 bar (MOP) einsetzbar und demnach für 40 bar geeignet.

Als Produkt wird hier Soluforce Hydrogen Tight H2T vorgeschlagen.

Diese Rohre sind in zwei Querschnitten erhältlich:

- 4 Zoll ($D_o = 125$ mm, $D_i = 98$ mm) und
- 6 Zoll ($D_o = 149$, $D_i = 120$ mm)

Der maximale Biegeradius wird von Soluforce mit 3 m angegeben. Das System wird in einer Spulenwicklung mit 400 m geliefert. Die Kosten für die Rohrleitung auf der Spule betragen Euro 100€/ pro Meter. Dieses Rohr wird in dieser Studie nachfolgend als H2T bezeichnet. Korrosionsbeständigkeit ist bei dem H2T-Rohr gegeben.

3.5.9 Auswahl Systemdruck und Rohrleitungen für weitere Betrachtungen.

Die Erkenntnisse aus der Rohrdimensionierung zeigen auf, dass technisch sowie wirtschaftlich eine Auslegung auf 40 bar sinnvoll ist. Es können im Handel standardmässig erhältliche Stahlrohre, Edelstahlrohre oder das Soluforce Hydrogen Tight H2T eingesetzt werden. Entsprechend wird die weitere Betrachtung für 40 bar durchgeführt.

3.6 Korrosionsschutz und Wasserstoffversprödung für erdverlegte Leitungen

3.6.1 Äusserer Korrosionsschutz bei erdverlegten Leitungen aus Stahl

Stahlleitungen für den Wasserstofftransport sind entsprechend den Vorschriften für Erdgasleitungen aus Stahl vor Korrosion im Erdreich zu schützen. Es können dieselben Umhüllungssysteme angewendet werden, wie bei Erdgas.

Mit Bezug zum Leitfaden H1000, Kapitel 8.5 zeigt sich bei den in dieser Studie ausgewählten Stahlleitungen folgende Übersicht zum Korrosionsschutz:

Tabelle 16 Anwendung Korrosionsschutz für verschiedene Stähle

Anlage gemäss H1000	Stahlgruppe	Stahlsorte	Umhüllungs-system	Galvanische Trennung	Normative Schutzkriterien für Beeinflus- sung durch DC und AC
C-Stahl	Unlegierter Qualitätsstahl	P235 TR1, P355 N	Notwendig gemäss SGK C2 gegen Makroelement- bildung und Streuströme, z.B. Kunststoffrohr	Notwendig mit Isolier- kupplung oder isolier- flansch	SGK C1SGK C2 SGK C3
Nichtrostender Stahl		X2CrNiMo1 7-12-2	Notwendig gemäss SGK C2 gegen Streuströme, z.B. Kunststoffrohr	Notwendig mit Isolier- kupplung oder isolier- flansch	SGK C2

3.6.2 Oberflächen und Innerer Korrosionsschutz bei Leitungen aus Stahl

Besonders für den Einsatz in der Mobilität ist auf eine hohe Reinheit des Wasserstoffs zu achten die Beschaffenheit nach Gruppe D ist nötig.

Deshalb soll bei der Auswahl der Rohrleitungen auf eine möglichst glatte innere Oberfläche geachtet werden. Weiterhin ist bei der Verarbeitung der Rohrleitungen darauf zu achten, dass kein Rost in den Leitungen verbleibt. Auf eine gründliche Reinigung der Rohrleitungen vor Inbetriebnahme muss geachtet werden (siehe Kapitel 12.1 in der Empfehlung H1000).

3.6.3 Korrosionsschutz für Leitungen aus RTP (Soluforce)

Das H2T-Rohr von Soluforce besteht aus faserverstärktem Thermoplast (RTP; Reinforced Thermoplastic Pipes) und verfügt bereits über eine nicht-korrosive HDPE-Umhüllung an Innen- und Aussenseite. (Quelle: [siehe Quellenverzeichnis – H2T Brochure](#))

Weitere Massnahmen hinsichtlich Korrosionsminimierung sind beim Einsatz dieser zertifizierten RTP-Leitungen von Soluforce nicht nötig.

3.6.4 Permeation und Wasserstoffversprödung

Die Permeation (Durchlässigkeit) durch Rohrleitungen und Behälterwände tritt zwar auf, das Ausmass ist aber vernachlässigbar (siehe H1000, Kap. 4.3.2).

Bei RTP-Rohren kann zusätzlich eine Barrierschicht aus Aluminium eingebaut werden.

Wasserstoffversprödung tritt besonders bei häufigen Lastwechseln auf, was für die hier gewählte Anwendung nicht zutrifft.

Neben häufigen Lastwechseln ist für das Ausmass der Wasserstoffversprödung weiterhin die Rauigkeit der Rohrleitung entscheidend. Die in dieser Studie gewählten Materialien weisen eine geringe Rauigkeit auf.

Für Kunststoffrohre und Rohre aus RTP ist die Permeation sowie die Wasserstoffversprödung kein Problem (siehe H1000, Kap.4.3.2 Abschnitt 4).

3.6.1 Fazit zu Oberfläche, Korrosion und Versprödung

Das untersuchte H2T_Rohr eignet sich bezüglich den Themen Korrosionsschutz und Versprödung gut für den Einsatz mit Wasserstoff. Es ist so konzipiert, dass alle Anforderungen bezüglich Korrosion bereits erfüllt sind.

Stahlrohre sind auch geeignet es müssen aber zusätzlich zur Verlegung des Rohres die geeigneten Massnahmen gegen Korrosion (z.B. Umhüllungen) erstellt werden.

4 Verlegung der Rohrleitungen

4.1 Abgrenzung Machbarkeitsstudie

Diese Machbarkeitsstudie klärt die technische Machbarkeit der Leitungsführungen ab. Eine projektspezifische Risikoanalyse ist nicht Teil der Aufgabe und wird hier nicht durchgeführt.

Folgende Punkte sind in späteren Projektphasen zu klären:

- Erschliessungsstrasse – Die Eisenbahnschienen verlaufen parallel zur Leitung (Risikoanalyse)
- Tanklager: Gefahren mit Zulieferung von Brennstoff und naheliegende Leitungen (Risikoanalyse)
- Tanklager: Bewilligungsfähigkeit der Spülbohrung unter dem Tanklager (Vorprojekt/Bauprojekt)
- Besitzverhältnisse der Parzellen und Abklärung von Durchleitungsrechten (Vorprojekt/Bauprojekt)
- Kein Bestandsschutz für Gasleitungen, wenn Neubauten erstellt werden sollten, welche die Umverlegung der Leitung nötig machen.
Projektrisiko bei der Variante Spülbohrungen im Falle von möglichen neu oder Umbauprojekten im Bereich der gewählten Trassenführung mit Wasserstoffleitungen
- Einbauten von Geotextilien (Ausführungsdetail Bauprojekt)
- Verlegung von Betonplatten oder U-Elementen zur Lastverteilung (Ausführungsdetail Bauprojekt)
- Verlegung in Betonkanälen in sensiblen Bereichen (z.B. Zufahrten, Details im Vorprojekt/Bauprojekt)

4.2 Grundlagen Trassenführung und Verlegung

4.2.1 Abstände

- **Zu anderen Leitungen**

Es werden die Abstände gemäss Empfehlung H1000, Kap.9.2 ausgeführt. Im Allgemeinen sind 40 cm zu parallelführenden und 20 cm zu kreuzenden Leitungen einzuhalten.

- **Eisenbahn**

Nach Rücksprache mit dem Betreiber (Hafenbahn) muss mindestens folgendes eingehalten werden:

- a) Unterquerung mind. 2 m unterhalb der Trasse,
- b) Abstand zur Schienenachse mindestens 2.5 m (gilt im 90° Winkel und auch für die Ränder von Start- und Zielgruben für Pressbohrungen).

- **Überdeckung**

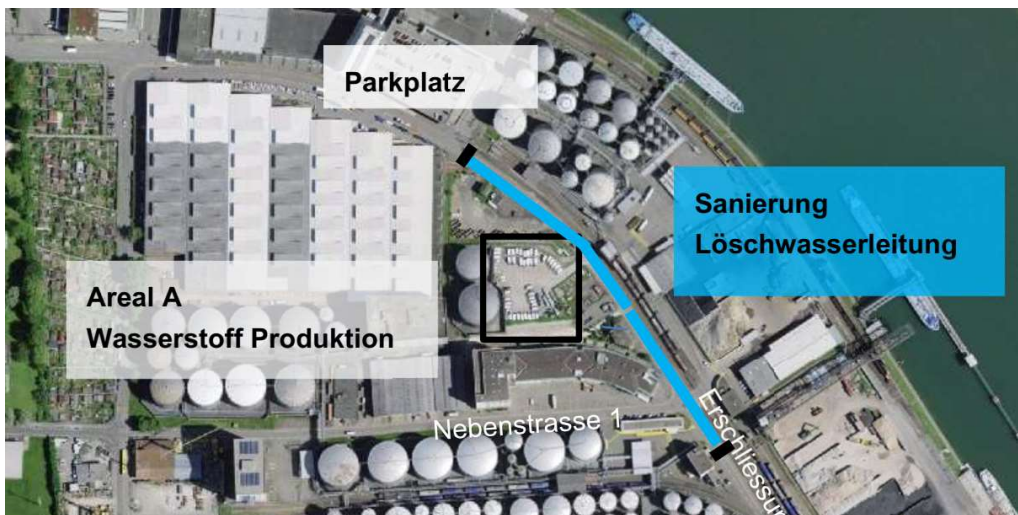
Die minimale Überdeckung von 80 cm kann eingehalten werden

4.2.2 Grundlagen Projekt Sanierung Löschwasserleitung

Beschreibung Projekt Sanierung Löschwasserleitung (Abschnitt 1)

Beim Projekt Sanierung der Löschwasserleitung handelt es sich um einen Ersatz der alten Löschwasserleitung durch eine neue Leitung im Bereich der Erschliessungsstrasse zwischen dem Parkplatz und dem Tanklager bei der Nebenstrasse 1. Zur Verlegung der neuen Löschwasserleitung wird ein Graben erstellt.

Abbildung 5 Projekt Sanierung Löschwasserleitung



4.2.3 Beschreibung Stilllegung Gasleitung

Zusammen mit dem Projekt Löschwasserleitung ist geplant, die Gasleitung DN 200 ab Parkplatz stillzulegen. In nachfolgender Abbildung ist die betroffene Gasleitung gelb eingezeichnet.

Abbildung 6 Stilllegung Gasleitung in der Erschliessungsstrasse



4.2.4 Leerrohrsysteme

Die Wasserstofftransportleitung kann auch zu einem späteren Zeitpunkt verlegt werden. In die bauseits erstellte Baugrube kann vorgängig ein Leerrohr verlegt werden. Folgend die Dimensionierung des Leerrohrs:

Für Leerrohre/Schutzrohre gelten die Anforderungen gemäss G2 Kap 7.2.4 bzw. Empfehlung G1000, Kapitel 9.4.6.

Aus Kapitel 3 geht hervor, dass folgende Rohrdimensionen für die Wasserstofftransportleitung angewendet werden können:

H2T-Rohr $D_o = 125 \text{ mm (4 Zoll)}$
Stahlrohr $DN 50 D_o = 60.3 \text{ mm}$

Die Dimension des Leerrohrsystems wird so ausgewählt, dass beide Varianten zur Ausführung möglich sind. Der gewählte Innendurchmesser des Leerrohrs liegt bei 195 mm.

Abbildung 7 Rohrdimensionen HDPE- Rohre als Leerrohre

System streng-guide

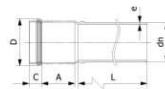


HDPE Kabelschutzrohre C+S gemufft coextrudiert aus Rezyklat

Aussen weiss mit roten Markierungsstreifen, innen schwarz, Scheiteldruckfestigkeit grösser SN 8

Mit Dichtung und weissem Schutzdeckel

Hohe Scheiteldruckfestigkeit durch Verwendung von HD-Rezyklat



dn	Artikel-	e	D	C	A	L	Gewicht	Palette	Preis
mm	Nr.	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m	m	CHF/m
72/60	152.413.124	6.0	95.4	39.5	77.0	5000	1.310	490	7.10
72/60	152.417.124	6.0	95.4	39.5	77.0	10000	1.290	980	6.40
92/80	152.413.126	6.0	116.6	43.6	88.0	5000	1.720	300	9.10
92/80	152.417.126	6.0	116.6	43.6	88.0	10000	1.680	600	8.40
112/100	152.413.128	6.0	138.2	47.7	99.0	5000	2.120	225	10.80
112/100	152.417.128	6.0	138.2	47.7	99.0	10000	2.080	450	9.90
132/120	152.413.130	6.0	160.4	53.7	110.0	5000	2.530	140	12.80
132/120	152.417.130	6.0	160.4	53.7	110.0	10000	2.480	280	11.60
163/148	152.413.134	7.5	194.8	58.6	132.4	5000	3.940	90	20.40
163/148	152.417.134	7.5	194.8	58.6	132.4	10000	3.840	180	18.70
214/195	152.413.136	9.5	254.5	69.2	181.8	5000	6.640	40	36.40
214/195	152.417.136	9.5	254.5	69.2	181.8	10000	6.430	80	33.10
250/231	152.413.044 ¹	9.6	293.0	56.0	94.0	5000	7.884	40	46.30
250/231	152.417.044 ¹	9.6	293.0	56.0	94.0	10000	7.632	80	42.40
315/291	152.413.048 ¹	12.1	363.6	63.0	104.0	5000	12.572	30	74.60
315/291	152.417.048 ¹	12.1	363.6	63.0	104.0	10000	12.136	60	68.40

Aus Abbildung 7 wird das Rohr in DN 214/195 mit 195 mm Innendurchmesser gewählt.

Bestehende und stillgelegte Leitung als Leerrohr verwenden

Hier gibt es aus technischer Sicht zwei zu verfolgende Möglichkeiten:

- **Verwendung der stillgelegten Löschwasserleitung DN 300**

Diese Variante ist aufgrund von Vorgaben aus der H1000 (Kap.9.4.6) nicht möglich, weil Schutzrohre nicht in Kennfarben anderer Medien gekennzeichnet sein dürfen.

- **Verwendung der bestehenden und stillgelegten Gasleitung DN 200 aus PE**

Im Projekt Sanierung Löschwasserleitung ist vorgesehen die Gasleitung im Bereich des Grabens stillzulegen und zurückzubauen. Stattdessen ist die Verwendung dieser Leitung als Leerrohr zum späteren Einzug einer Wasserstoffleitung technisch möglich und wird hier bewertet.

Prüfung der Dimension der Gasleitung für Einzug der Wasserstoffleitung

Gasleitung als Leerrohr	DN 200 D _o = 225 mm, D _i = 203.4 mm	
H2T-Rohr von Soluforce	Rohr D _o = 125 mm	Einzug möglich
Stahlrohr	DN 50 D _o = 60.3 mm	Einzug möglich

Die geplante Wasserstofftransportleitung kann in die bestehende Gasleitung (Leerrohr) DN 200 eingezogen werden.

4.3 Varianten für die Trassenführung

Es werden zwei Varianten für die Verbindungsleitung (Wasserstofftransport) zwischen Wasserstoffproduktion und Abfüllstation untersucht und verglichen.

Es wird für die Installation vorgeschlagen mit dem H2T Rohr in 4 Zoll zu arbeiten.

Eine Verlegung mit Stahlleitungen ist auch möglich. Die Kosten für die verschiedenen Varianten werden in Kapitel 5 erhoben und verglichen.

Der Übersichtsplan in Abbildung 8 zeigt exemplarisch diese zwei Varianten:

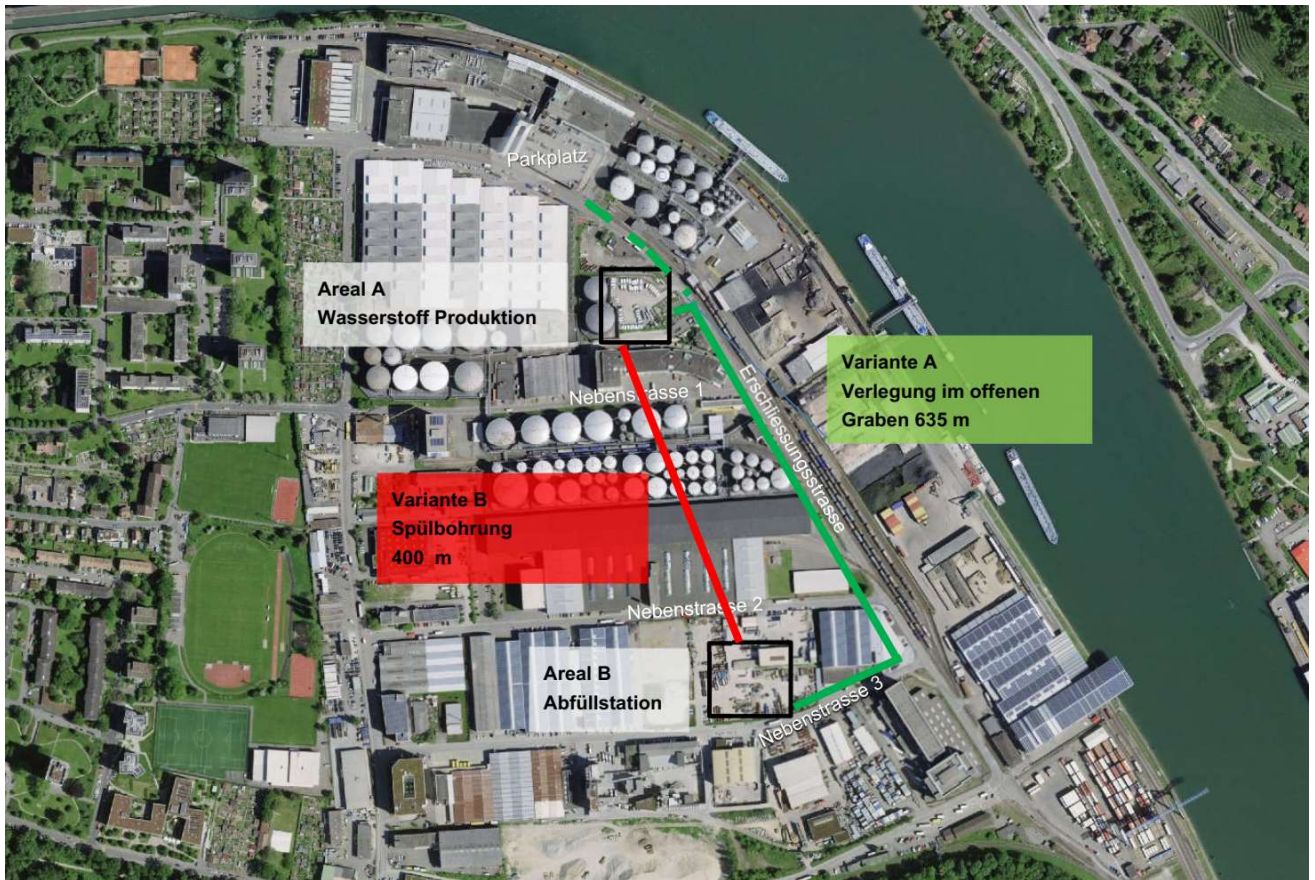
Variante A (grün) Verlegung im Graben in der Erschliessungsstrasse und in der Nebenstrasse 3, Queren von Hindernissen soll mit Pressbohrungen realisiert werden.

Variante B (rot) Eine grabenlose Verlegung soll mittels Spülbohrung realisiert werden.

Verbindung zum Parkplatz (grün-gestrichelt)

Das Projekt Sanierung Löschwasserleitung (Endpunkte in Schwarz) führt über den Anschlusspunkt hinaus bis zu einem Parkplatz. Für diesen Abschnitt wird die Verlegung einer Wasserstoffleitung ebenfalls geprüft.

Abbildung 8 Übersicht Varianten für die Verbindungsleitung



Leerrohrsystem

Für Variante A ist zu klären, ob es sinnvoll ist ein Leerrohrsystem zu verlegen und später die Wasserstoffleitung dort einzuziehen.

In Variante B wird mit der Spülbohrung ein Leerrohr erstellt (Kunststoff oder Bentonit) die Wasserstoffleitung wird dann im zweiten Schritt in das Leerrohr eingezogen.

4.4 Variante A – Verlegung im Graben in der Erschliessungsstrasse und Nebenstrasse 3

Bei der Trassenführung nach Variante A ist zu prüfen ob Synergien mit dem Projekt zur Sanierung der Löschwasserleitung in der Erschliessungsstrasse bestehen.

Die Trasse nach Variante A wird wie folgt in zwei Abschnitte eingeteilt.

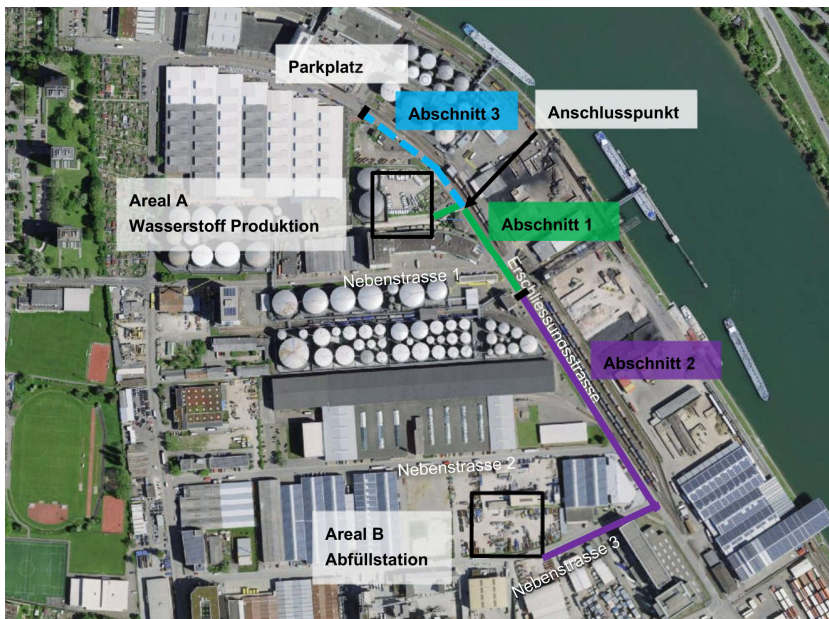
- Abschnitt 1 (Länge 145 m, grüne Linie in Abbildung 9)
Es wird geprüft, ob die Verlegung einer Wasserstoffleitung oder eines Leerrohrsystems möglich ist.
- Abschnitt 2 (Länge 480 m, violette Linie in Abbildung 9)
ab "Ende Sanierung Löschwasserleitung"(schwarzer Strich in Abbildung 9) bis zur Abfüllstation.
Es wird geprüft, ob die Leitungsführung im Bereich machbar ist. Die Hindernisse werden beschrieben

Die Verbindungsleitung zwischen Wasserstoffproduktion und Abfüllstation besteht aus Abschnitt 1 und 2 und hat eine Gesamtlänge von ungefähr 625 m.

Abschnitt 3 (Länge ca. 155 m, blaue Linie in Abbildung 9) Es wird geprüft:

- Trassenführung und Hindernisse
- Mögliche Verlegung in der stillgelegten Gasleitung (Gasleitung als Leerrohr).
- Verlegung eines Leerrohrs

Abbildung 9 Übersicht Variante A



4.4.1 Lösungen mit Leerrohr bei Variante A

Es ist machbar entweder ein neues Leerrohr DN 200 zu verlegen und/oder in gewissen Abschnitten die bestehende Gasleitung zu verwenden.

Es ergeben sich folgende Einschränkungen:

- Die bestehende Gasleitung verläuft nicht in allen Leitungsabschnitten horizontal. Es sind teilweise Versprünge vorhanden. An diesen Stellen muss für den späteren Einbau der Leitungen der Graben jeweils wieder geöffnet werden.
- Es muss damit gerechnet werden, dass für einen späteren Einzug die bestehende Gasleitung nur in Teilabschnitten benutzt werden kann.
- An diversen Stellen (Versprüngen) muss aufgegraben werden, um das neue Rohr dann einzuziehen.
- Weiter ist im Bereich der Energie- und Leitungstunnel (ELTs) besonders ELT 2 ein grosser Versatz zu überwinden. Folgende Bilder zeigen die Situation im Bereich der beiden ELTs.

Abbildung 10 ELT 2 - Verlegung Wasserstoffleitung in bestehender Gasleitung (gelb)

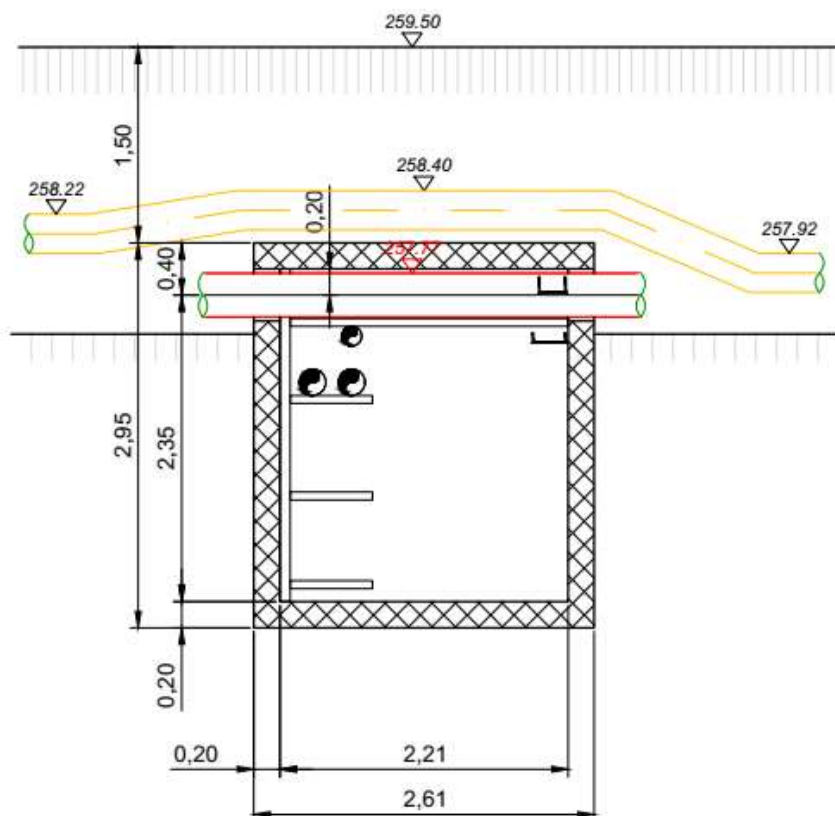
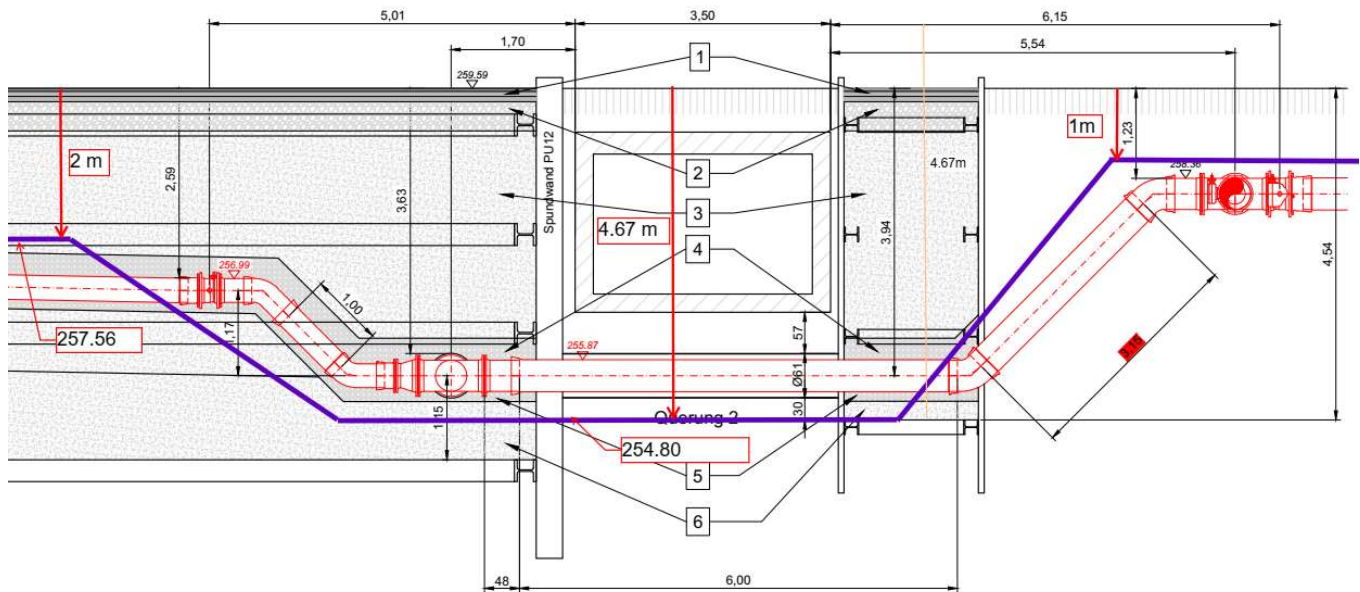


Abbildung 11 ELT 2 in Abschnitt 1 Verlauf Wasserstoffleitung in violett



Abschnitt 1

Die Gasleitung ist nur in einem Teil der Strecke verlegt (63 m von 145 m; siehe Abbildung 6 auf dem Rest der Strecke müsste ein neues Leerrohrsystem verlegt werden.

Abschnitt 2

Es ist keine stillgelegte Gasleitung vorhanden und weil hier mit der Sanierung der Löschwasserleitung nicht aufgegraben wird, kann auch kein Leerrohr verlegt werden.

Abschnitt 3

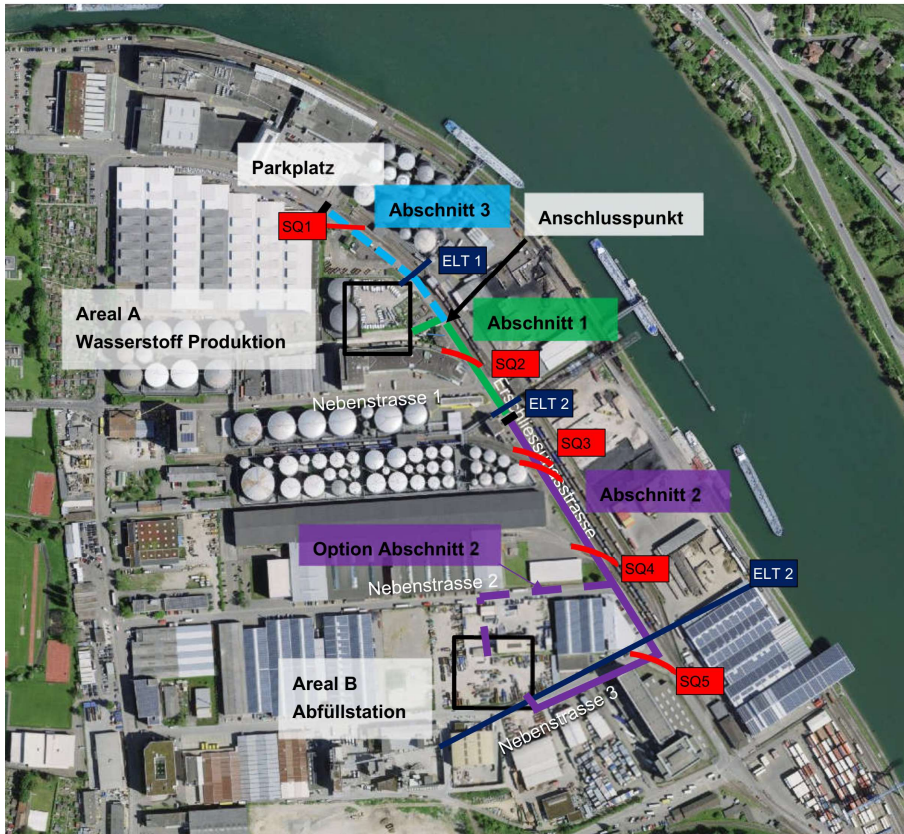
Es ist auf dem gesamten Abschnitt eine Gasleitung vorhanden, diese könnte als Leerrohr verwendet werden. Auf Grund von Versprüngen z.B. Beim ELT 1 müsste bei einer späteren Verlegung der Wasserstoffleitung eventuell an einigen Stellen aufgegraben werden.

Fazit Leerrohr

Auf Grund der aufgeführten Einschränkungen und da der Graben mit dem Projekt Löschwasserleitung geöffnet wird, empfehlen wir nicht mit Leerrohren zu arbeiten, sondern die Wasserstofftransportleitung direkt zu verlegen. Ebenfalls sind die Leerrohre siehe Abbildung 7 ähnlich teuer in der Beschaffung wie das Stahlrohr Tabelle 15 welches später direkt Wasserstoff führen kann. Die Installation des Leerrohres lohnt sich also eher nicht.

4.4.2 Variante A Trassenführung im Detail

Abbildung 12 Übersichtsbild Variante A (Detail) inklusive Hindernisse



ELT = Energie- und Leitungstunnel

SQ = Schienenquerung

4.4.3 Abschnitt 1

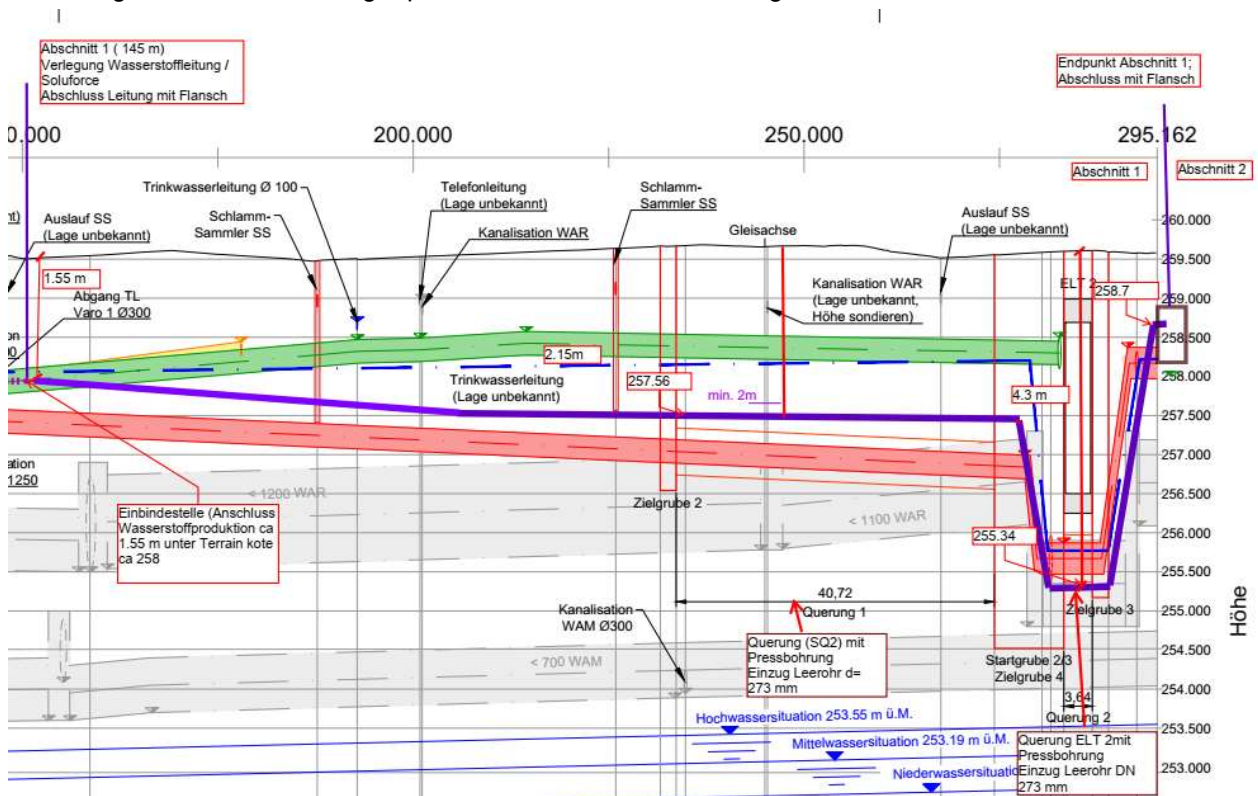
Anschluss Abschnitt 1

Abschnitt 1 wird bei Ausführung der Wasserstoffproduktion ab dem Areal "Wasserstoffproduktion" mittels eines Grabens bis zum Anschlusspunkt verbunden. Dafür wird die Erschliessungsstrasse überquert. Die Wasserstoffleitung wird dort auf Höhe der Gasleitung 1.55 m unter Terrain verlegt und kann so die Kanalisation oberhalb, kreuzen. Diese Verbindung wird erst bei Ausführung der Anlage erstellt.

Beschrieb Ausführung Abschnitt 1

Es wird vorgeschlagen ab Anschlusspunkt bis zur Schnittstelle zu Abschnitt 2 die Wasserstoffleitung direkt zu verlegen (140 m). An beiden Endpunkten wird eine Flanschverbindung vorbereitet. Die Endpunkte können je über einen Schacht zugänglich gemacht werden.

Abbildung 13 Abschnitt 1, Längenprofil Verlauf Wasserstoffleitung in violett



Schienenquerung (SQ) und Unterquerung ELTs

Die Schienenquerung und die Unterquerung ELT 2 erfolgt mittels einer Pressbohrung ($D_o = 273$ mm, Stahlrohr). Die Wasserstoffleitung verläuft leicht oberhalb, parallel zur Löschwasserleitung und mit zunehmender Verlegetiefe (1.55 m bis 2.15 m SQ2) bis zur Schienenquerung 2.

ELT 2 wird auf Niveau 4.67 m unter Terrain unterquert siehe Abbildung 11. Anschliessend steigt die Leitung auf ungefähr -1 m UK-Terrain bis zum Endpunkt von Abschnitt 1 wieder an.

Es werden die Start- und Zielgruben aus dem Projekt "Ersatz Löschwasserleitung" mitverwendet, diese müssen jeweils um 1 m verbreitert werden

4.4.4 Abschnitt 2

Für Abschnitt 2 muss im Ausführungsfall der Graben separat erstellt werden. Dieser Graben soll erst erstellt werden, wenn die Wasserstoffleitung direkt verlegt wird.

Für die drei Schienenquerungen (2x Erschliessungsstrasse, SQ 3 und SQ4, 1x Nebenstrasse 3 SQ5, siehe Abbildung 12 gelten dann die üblichen Abstandsregeln.

Im Bereich Erschliessungsstrasse und Nebenstrasse 3 ist ELT 3 vorhanden und muss zwei Mal gekreuzt werden.

Schienenquerungen und ELTs können mit Pressbohrungen unterquert werden (siehe Abschnitt 1).

Die Querung der Kanalisation ab Erschliessungsstrasse in Richtung Nebenstrasse 3 erfolgt auf Verlegetiefe der Wasserstoffleitung 0.80 m bis 1 m unterhalb des Terrains und kann so ohne weiteres die Kanalisation kreuzen.

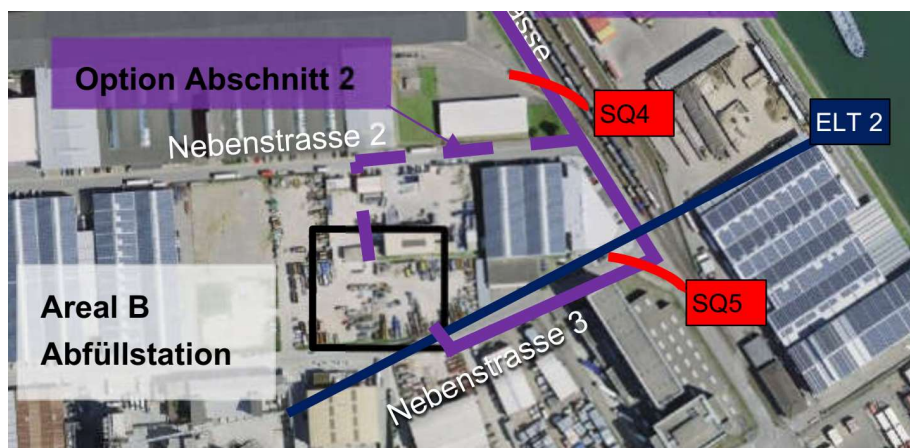
Die Leitungsführung im Abschnitt 2 ist, wie beschrieben machbar.

Option Leitungsführung über Nebenstrasse 2

Das Gelände für die Abfüllstation, könnte auch alternativ über die Nebenstrasse 2 und dann über das Areal der Abfüllstation erschlossen werden.

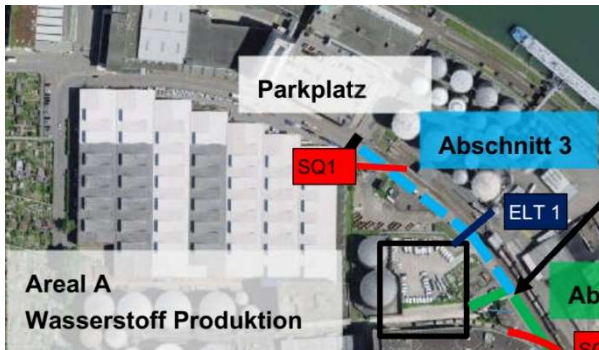
Dies spart die doppelte Querung des ELT 3 und der Eisenbahn (SQ5) an der Nebenstrasse 3. Diese Ausführung ist im weiteren Verlauf des Projekts zu klären.

Abbildung 14 optionale Leitungsführung in Abschnitt 2



4.4.5 Abschnitt 3

Abbildung 15 Ausschnitt für Abschnitt 3



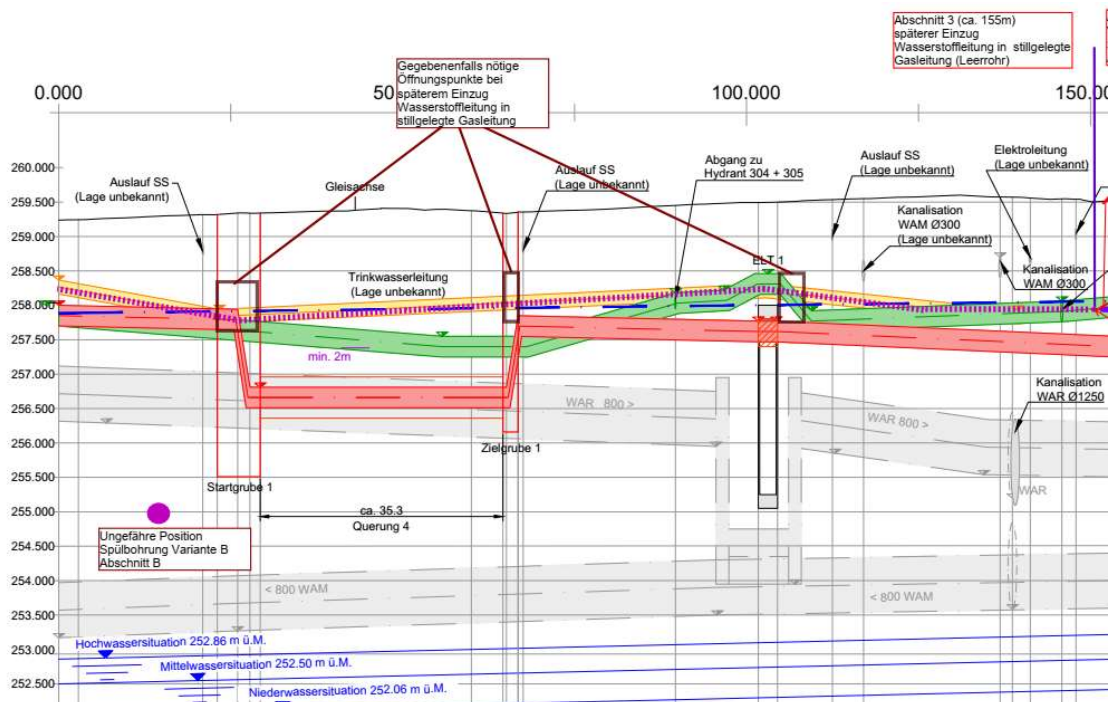
Beschrieb Ausführung

Abschnitt 3 kann die bestehende Gasleitung als Leerrohr verwendet werden. Bei späterer Verlegung der Wasserstoffleitung (Länge 155 m) wird angenommen, dass am Startpunkt, beim ELT 1 und am Endpunkt zwecks Zugangs aufgedigelt werden muss.

Alternativ kann eine andere Leitungsführung auf dem Gelände geprüft werden so dass ELT 1 nicht unterquert werden muss.

Im Rahmen der folgenden Bauarbeiten (offener Graben) soll beurteilt werden, ob die Gasleitung erhalten werden kann (Zustand, Tauglichkeit als Leerrohr) oder ob Sie durch neue Leerrohre ersetzt werden muss.

Abbildung 16 Abschnitt 3 Längenprofil, braun bestehende Gasleitung, violett gestrichelt Wasserstoffleitung für späteren Einzug



Begründung

Es ist unklar, ob in Abschnitt 3 jemals Wasserstoff transportiert wird. Deshalb ist ein Ausbau vorab nicht nötig und es kann, bei Bedarf, später die Gasleitung als Leerrohr verwendet werden.

Eine direkte Verlegung der Wasserstoffleitung kann auch ausgeführt werden. Dann ist zu empfehlen die Leitung gleich ohne Leerrohr und an Stelle des jetzigen Trasses für die Gasleitung zu verlegen (Rückbau Gasleitung).

4.4.6 Fazit Variante A

Die Verlegung einer Wasserstoffleitung kann in der Trasse nach Variante A erfolgen. Im Bereich des Projekt Löschwasserleitung kann die Wasserstoffleitung direkt mitverlegt werden oder es kann ein Leerrohr verlegt werden.

Empfohlen wird die direkte Verlegung der Wasserstoffleitung, um Kosten zu sparen.

Für die verschiedenen Leitungsabschnitte gilt:

In Abschnitt 1 wird eine direkte Verlegung der Wasserstoffleitung vorgeschlagen. Der Graben wird mit dem Projekt Sanierung Löschwasserleitung geöffnet. Ein Leerrohrsystem ist hier nicht vorteilhaft.

In Abschnitt 2 Ist der Einbau der Wasserstoffleitung möglich. Die Hindernisse können überwunden werden. Der Einbau ist allerdings erst mit dem Entscheid zur Umsetzung der Wasserstoffproduktionsanlage zu empfehlen. Die Strasse müsste dafür geöffnet werden.

In Abschnitt 3 Die Gasleitung kann als Leerrohr für eine spätere Verlegung einer Wasserstoffleitung verwendet werden. Mit der Durchführung des Projekts "Sanierung Löschwasserleitung" soll der Zustand der Gasleitung für den späteren Einzug einer Wasserstoffleitung geprüft werden. Anstelle der Gasleitung könnte alternativ gleich die Wasserstoffleitung verlegt werden, was zu empfehlen ist.

4.5 Variante B –Spülbohrung

Variante B befasst sich mit der Möglichkeit einer Verbindungsleitung mittels Spülbohrung durchzuführen.

Eine Spülbohrung verbindet Areal A auf direktem unterirdischem Weg mit Areal B. Für die Spülbohrung wird zunächst einen Start und eine Zielgrube ausgehoben. Danach wird eine Pilotbohrung von Start zur Zielgrube durchgeführt. Anschliessend wird das Bohrloch aufgeweitet und der Rohreinzug durchgeführt.

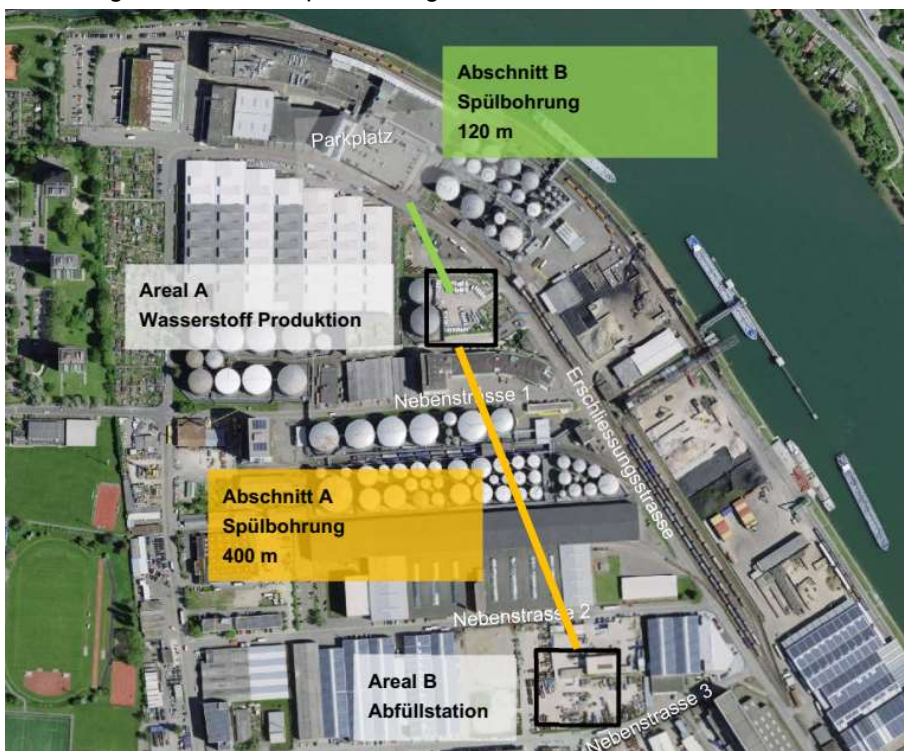
Für Abschnitt A und B wird untersucht, ob es mit den bekannten Hindernissen im Erdreich möglich ist eine Linienführung für die Bohrung zu finden. Anschliessend werden die Kosten der Spülbohrung abgeschätzt.

Die Bewilligungsfähigkeit und die Durchleitungsrechte werden in dieser Studie nicht abgeklärt.

Abschnitt A (orange) Verbindungsleitung; Die Spülbohrung (Länge 400 m) verbindet die Wasserstoffproduktion und die Abfüllstation auf direktem Weg.

Abschnitt B (grün) Die Spülbohrung (Länge 120 m) erschliesst den Parkplatz

Abbildung 17 Übersicht Spülbohrungen Abschnitt A und Abschnitt B



4.5.1 Beschreibung Abschnitt A

Auf der Strecke im Abschnitt A sind folgende mögliche Hindernisse vorhanden

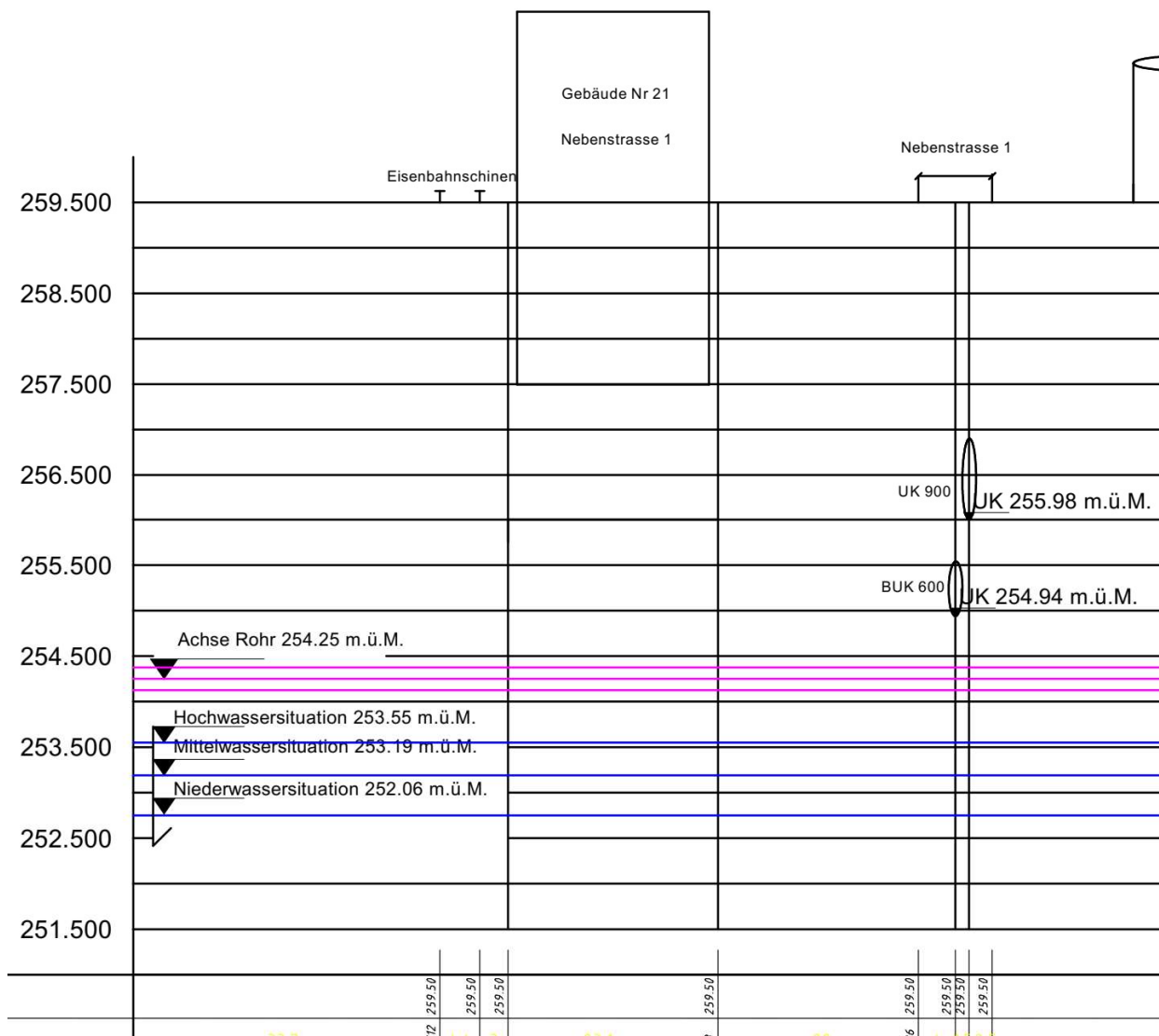
- 3 Gebäude (Gebäude 1 mit Untergeschoss Kote UK -3.5 m unter Terrain)
- Tanklager (ebenerdig)

- Kanalisationen in der Nebenstrasse 1 – und Nebenstrasse 2 (siehe Beilage 4)
- Hochwasserkote 253.55.m ü.M.

Siehe Ausschnitt Längenprofil in Abbildung 18.

Eine horizontale Spülbohrung mit Durchmesser 250 mm für einen anschliessenden Einzug einer Wasserstoffleitung kann auf Kote 254.25 m ü.M. (Achse der Wasserstoffrohrleitung) erfolgen. Eine Spülbohrung ist technisch machbar.

Abbildung 18 Ausschnitt Längenprofil für horizontaler Spülbohrung



4.5.2 Beschrieb Abschnitt B

Um das Gebiet im Bereich des Parkplatzes zu erreichen ist ebenfalls eine Spülbohrung möglich.

Es ist vorgesehen die Bohrung bis direkt zu dem Parkplatz zu führen. Ein Anschlusspunkt würde einige Meter weiter hinten im Vergleich zu bei Abschnitt 3 aus Variante A zur Verfügung stehen.

Hindernisse in diesem Abschnitt sind:

- Trafostation (steht nur auf Bodenplatte, sollte kein Problem darstellen)
- Eisenbahn (Unterquerung 2 m Unterkante Terrain)
- Abwasserleitungen WAM 800 mit Achse ca. 256.5 m ü.M.
und WAR 800. mit Achse ca. 253.55 m ü.M.

Die Spülbohrung würde zwischen den beiden Abwasserleitungen/ Kanälen durchführen. Ein lichter Abstand von über 2m ist gewährleistet. Achse ca. 255 m ü.M. Siehe Position Spülbohrung in Abbildung 16 (violetter Punkt).

Sobald klar ist, ob tatsächlich eine Absatzmöglichkeit für Wasserstoff über Abschnitt B besteht, kann das Ziel der Bohrung auf den korrekten Punkt ausgerichtet werden.

Nach Entscheid für einen Anschluss in diese Richtung, müssen die Details für ein Ausführungsprojekt erarbeitet werden.

Zu klärenden Details sind hier zum Beispiel:

- Start und Endpunkt der Bohrung
- Präzise Lage der Spülbohrung bezüglich Hindernisse (besonders Kanalisation in der Erschliessungsstrasse (siehe Beilage 1)

4.5.3 Fazit Spülbohrungen

Spülbohrungen nach Variante B können für beide Abschnitte A und B ausgeführt werden. im Kapitel 5

– Werden die Kosten für die Spülbohrung untersucht.

5 Kostenschätzung ± 25%

Die Kostenschätzung beinhaltet alle Aufwände für die Erstellung der Verbindungsleitung und versteht sich exklusive Honorare und MWST.

5.1 Grundlagen Kostenschätzung

In den folgenden Tabellen sind die Grundlagen für die Kostenschätzung zusammengestellt und kommentiert; die Tiefbauarbeiten und die Schweissarbeiten sind vorsichtig geschätzt. Die Kosten zeigen Gesamtkosten für die Verlegung auf. Es werden keine Abzüge auf Grund von Synergien mit dem Projekt " Sanierung Löschwasserleitung" dargestellt.

Tabelle 17 Kosten Verlegearbeiten für Rohre mit 40 bar Betriebsdruck im offenen Graben verlegt

	Stahl P235 TR1 DN 50 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50, 40 bar	RTP Soluforce H2T 4 Zoll 40bar	Stahl P355N DN 50 750 bar
	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
Einkaufspreis/ m	18	31	100	55
Korrosionsschutz (Schätzung)	30	30	-	30
Tiefbau	1'300	1'300	1'300	1300
Verlegung und Mon- tage	300	350	150	350
Total Kosten pro m	1'650	1'710	1'550	1'735

Tabelle 18 Kosten Verlegearbeiten für Rohre mit 40 bar Betriebsdruck mit Spülbohrung

	Stahl P235 TR1 DN 50	Edelstahl X2CrNiMo17-12- 2 DN 50	RTP Soluforce H2T 4 Zoll	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
Einkaufspreis/ m	18	31	100	55
Korrosionsschutz (Schätzung)	30	30		30
Tiefbau / Bohrung	1'000	1'000	1'000	1'000
Verlegung und Montage	300	350	150	350
Total/Kosten pro m	1'350	1'410	1'250	1'435

Tabelle 19 Übersicht grob geschätzte Kosten für Reinigung /Prüfung /Inbetriebnahme

	Stahl /Edelstahl DN 50	RTP Soluforce H2T 4 Zoll DN 50	P355N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF
Reinigung	7'000	5'000	7'000
Prüfung /Abnahme	7'000.	7'000	12'000
Inbetriebnahme	7'000	7'000	10'000
Total/Kosten	21'000	19'000.-	29'000.-

Aufwandschätzungen für Reinigung/Inbetriebnahme und Abnahme ergeben sich wie folgt:

Für Stahlleitungen:

pro Abschnitt 2 Arbeitstag für 2 Mann + Einsatz Maschinen ($4 \cdot 1'500 + 1000 = 7'000.-$).

Für Soluforce:

Pro Arbeitsschritt 2 Mann, 1 Arbeitstag + Maschinen ($2 \cdot 1500 + 500 = 5'000$)

Der Aufwand für die Soluforce Leitung wird als geringer eingeschätzt, weil das Rohr H2T Rohr, als Zertifiziert Wasserstoffleitung auf Rollen a 400 m und bereits gereinigt angeliefert wird.

5.2 Kosten pro Ausführungsabschnitt

5.2.1 Variante A Abschnitt 1; offener Graben

Tabelle 20 Abschnitt 1 Kosten Einbau Leitungen Abschnitt 1; Trassenlänge 145 m

	Stahl P235 TR1 DN 50, 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50, 40 bar	RTP Soluforce H2T 4 Zoll 40 bar	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Graben und Leitung	239'250	247'900	224'750	251'575
IBN /Abnahmen	21'000	21'000	19'000	29'000
Zielgruben/Startgruben ¹⁾	40'000	40'000	40'000	40'000
Spezialbauwerke und Unterstossungen ²⁾	70'000	70'000	70'000	70'000
Total/Kosten	370'250	378'950	350'750	390'575

- 1) Geschätzte Kosten für die Erstellung von 4 Start und Zielgruben (CHF 10'000/Stück) CHF 40'000.-
- 2) Pressbohrungen, ELT 2 (4 m), SQ 2 (41 m) CHF 1300/m = 58'800 Und Schächte am Start und Zielpunkt ca. 10'000 = 70'000

Bemerkung:

Die geschätzten Kosten für Abschnitt 1 können mit Kombination mit dem Löschwasserprojekt verringert werden. Der Kostenteiler für den Graben wäre zu vereinbaren.

5.2.2 Variante A Abschnitt 2, offener Graben

Tabelle 21 Kosten Einbau Leitungen Abschnitt 1; Trassenlänge 480 m

	Stahl P235 TR1 DN 50	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50	RTP Soluforce H2T 4 Zoll	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Graben und Leitung	792'000	820'800	744'000	832'800
IBN / Abnahmen	21'000	21'000	19'000	29'000
Zielgruben/Startgruben ¹⁾	50'000	50'000	50'000	50'000
Spezialbauwerke und Unterstossungen ²⁾	215'000	215'000	215'000	215'000
Total/Kosten	1'078'000	1'106'800	1'028'000	1'126'800

- 1) Geschätzte Kosten für die Erstellung von 10 Start und Zielgruben (CHF 5'000/Stück) = 50'000
- 2) Pressbohrungen ELT 3 (2x 6m), SQ 3 (ca. 60 m) SQ 4 (ca. 40m) SQ 5 (ca. 40m) CHF 1300.-/m 197'600.- + Einbindestellen Anfang und Ende Abschnitt 2 CHF 15'000 Total 215'000.-

Bemerkung:

Die geschätzten Kosten für Abschnitt 2 können mit Kombination mit dem Löschwasserprojekt verringert werden. Der Kostenteiler für den Graben wäre zu vereinbaren.

5.2.3 Variante A, Abschnitt 3; offener Graben

Tabelle 22 Kosten Einbau Leitungen im Graben Abschnitt 3; Trassenlänge 155 m

	Stahl P235 TR1 DN 50	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50	RTP Soluforce H2T 4 Zoll	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Graben und Leitung	255'750	265'050	240'250	268'925

IBN-Abnahmen	21'000	21'000	19'000	21'000
Zielgruben/Startgruben ¹⁾	40'000	40'000	40'000	40'000
Total/Kosten	316'750	326'050	299'250	329'925

- 1) Grube am Anfang und Ende der Leitung. eventuell 1-2 x dazwischen
CHF 40'000

Bemerkung:

Die geschätzten Kosten für Abschnitt 3) können mit Kombination mit dem Löschwasserprojekt verringert werden. Der Kostenteiler für den Graben wäre zu vereinbaren.

5.2.4 Variante B Spülbohrung Abschnitt A

Tabelle 23 Variante B Abschnitt A; 400 m

	Stahl P235 TR1 DN 50, 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50, 40 bar	RTP Soluforce H2T 4 Zoll 40 bar	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Graben und Leitung	540'000	564'000	500'000	574'000
IBN / Abnahmen	21'000	21'000	19'000	21'000
Zielgruben/Startgruben ¹⁾	40'000	40'000	40'000	40'000
Total/Kosten	601'000	625'000	556'000	635'000

1) 1x Startgrube, 1x Zielgrube je CHF 20'000 = 40'000.-

5.2.5 Variante B Spülbohrung Abschnitt B zum Parkplatz

Tabelle 24 Variante B, Abschnitt B, 120 m

	Stahl P235 TR1 DN 50, 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50, 40 bar	RTP Soluforce H2T 4 Zoll, 40 bar	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Graben und Leitung	162'000	169'200	150'000	172'200
IBN/Abnahmen	21'000	21'000	19'000	21'000
Zielgruben/Startgruben ¹⁾	20'000	20'000	20'000	20'000
Total/Kosten	203'000	210'200	189'000	213'200

5.2.6 Zusammenstellung und Vergleich Kosten Verbindungsleitung

Tabelle 25 Zusammenstellung Kosten für Verbindungsleitung

	Stahl P235 TR1 DN 50. 40 bar	Edelstahl X2CrNiMo17- 12-2 DN 50, 40 bar	RTP Soluforce H2T 4 Zoll, 40 bar	Stahl P355 N DN 50 750 bar
	CHF	CHF	CHF	CHF
Im offenen Graben				
Abschnitt 1	370'250	378'950	350'750	390'575
Abschnitt 2	1'078'000	1'106'8000	1'028'000	1'126'800
Variante A Summe offener Graben ¹⁾	1'448'250	1'485'750	1'375'750	1'517'375
Variante B Summe Spülbohrung	601'000	625'000	556'000	635'000

1) Ohne Kostenteiler Graben mit Projekt Löschwasserleitung. Kostenreduktion von CHF 150'000-200'000.- mit Kostenteiler möglich.

5.2.7 Fazit Kosten

Auswahl Rohrleitungen

Eine Lösung mit 40 bar und H2T Rohr ist zu empfehlen, weil daraus die tiefsten Kosten pro Meter resultieren.

Die verschiedenen Varianten mit Stahl und Edelstahl unterscheiden sich in den Gesamtkosten für die Anlage nicht wesentlich. Die Beschaffungskosten für die Rohrleitung (auch dickwandige) fallen im Verhältnis zum Aufwand für die Verlegung der Rohrleitungen und die Tiefbauarbeiten kaum ins Gewicht.

Auswahl Verlegung

Im untersuchten Fall ist die Verlegung der Leitung mittels Spülbohrung deutlich günstiger. Daher ist die Verlegung mittels Spülbohrung zu empfehlen.

6 Bevorzugte Variante und Begründung

6.1 Zusammenfassung

Es wird empfohlen die Verbindungsleitung zwischen Areal A und Aral B wie folgt auszuführen:

Anordnung der Rohrleitungen	Nach Variante 2 in Kapitel 2 mit Aufbereitung (Druck, Beschaffenheit) beim Verbraucher
Druckniveau	40 bar
Rohrleitungsmaterial	RTP; H2T_von Soluforce in DN 100
Verfahren	Spülbohrung
Kosten	Günstigste Variante (CHF 556'000)

6.2 Auswahl Anordnung der Rohrleitungsanlage

Auswahl: Variante 2 nach Kapitel 2

Begründung:

Für die Anordnung der Rohrleitungsanlage wird **Variante 2 nach Kapitel 2** ausgewählt. Die Anlage wird auf 40 bar ausgelegt.

Dazu gibt es folgende Begründung

- **Flexibilität:**
Bei Aufbereitung beim Abnehmer können, ab der Verbindungsleitung eventuell später weitere Verbraucher mit abweichenden Anforderungen angeschlossen werden. Der hohe Anspruch an Beschaffenheit und Druck für Mobilität wird erst bei der Abfüllstation / Tankstelle bereitgestellt
- **Druckniveau**
Bezüglich Druckniveau kann 40 bar gewählt werden. So kann der bereitgestellte Druck ab Elektrolyse genutzt werden.
- **Energieaufwand Kompression**
Die Vergleichstabelle zeigt, dass mit der gewählten 40 bar Variante die bereitzustellende Druckdifferenz (siehe Tabelle 26) am Kompressor geringer sein muss als bei den anderen Varianten.

Tabelle 26 Vergleich / Übersicht verschiedener Auswahlmöglichkeiten für die Anordnung der Rohrleitung, Druck und Werkstoff

Druck Leitung	40 bar	750 bar
Dimension Verbindungsleitung	DN 50 (Stahl; Edelstahl) DN100 (RTP, H2T)	DN 50
Wandstärke	Stahl – 3.2mm Edelstahl – 3.6 mm	Stahl 14.2mm Edelstahl – k.A.
Druck Elektrolyse	40 bar	40 bar
Druck Tankstelle	700 bar	700 bar
Ange-setzter Differenzdruck Verbindungsleitung	5 bar	
Kompression		
Beim Abnehmer (Variante 2; Kap2)	X	
Anfang Leitung (Variante 1 Kap1)		X
Druckdifferenz Kompression	665 bar (35 bis 700)	710 bar (40 auf 750)
Druckreduktion		
Bei Tankstelle		50 bar

6.3 Auswahl des Werkstoffes für die Rohrleitung

Auswahl RTP- Rohrleitung (H2T von Soluforce) DN 100

Begründung:

Es wird die H2T Rohrleitung von Soluforce mit 4" empfohlen, weil

- Die Verlegung gegenüber der Stahlleitung einfacher und zeitlich kürzer ist. Die Leitung kann ab Rolle direkt verlegt werden.
- Kostengünstigste Variante
- Geprüftes und zugelassenes Rohrleitungssystem
- Weniger Rohrverbindungen und Schweissnähte; entsprechend weniger Schwachstellen
- Keine weiteren Massnahmen bezüglich des Korrosionsschutzes ergriffen werden müssen, die Leitung ist direkt einsatzfähig.
- Geringster Aufwand für Reinigung und Prüfung

6.4 Auswahl der Trassenführung:

Es wird Variante B mit Spülbohrung empfohlen, weil:

- Die Spülbohrung deutlich einfacher und günstiger in der Ausführung ist, als die Leitung im Graben in der Erschliessungsstrasse (Variante A) zu verlegen.
- Kurze Leitungsführung (400 m, statt 625 m)
- Geringster Aufwand für Tief- und Leitungsbau

6.5 Weitere Überlegungen zur ausgewählten Lösung

Die vorgeschlagene Auswahl des Rohrleitungsmaterials und der Trassenführung bezieht sich besonders auf eine direkte Verbindungsleitung von Areal A nach Areal B.

Sollen später weitere Verbraucher an diese Verbindungsleitung angeschlossen werden müssen weitere Kriterien für die Auswahl der Leitung mit einbezogen werden.

Folgendes ist dann zu bedenken:

- Bei Spülbohrungen können später keine Anschlüsse entlang der Verbindungsleitung erstellt werden
- Anschlüsse an erdverlegte Stahlleitungen ist gängige Praxis und kann relativ einfach ausgeführt werden.
- Anschlüsse an H2T Leitungen, sind möglich, allerdings gegenwärtig nur durch den Lieferanten der Leitung (Soluforce). Diese RTP-Leitungen sind bisher zu wenig verbreitet, als dass es verschiedene Anbieter gibt, welche mit der Verarbeitung (Verbindung) dieser Art Rohrleitungen vertraut sind.

Es hat sich mit der Kostenschätzung gezeigt, dass eine 750 bar Leitung in der Erstellung nicht wesentlich teurer wird als die 40 bar Leitung. So könnte es, je nach Situation (z.B. kein Platz für Kompression auf Aral B) gegebenenfalls Sinn ergeben die Anordnung nach Variante 1 in Kapitel 2 zu wählen und die Leitung mit 750 bar zu betreiben.

Quellenverzeichnis

Normen und Richtlinien

SN EN 13480-3:2017 Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Konstruktion und Berechnung.

SN EN 13480-6:2013 Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 6: Zusätzliche Anforderungen für erdgeackte Rohrleitungen

prEN 1594:2022 Gasinfrastruktur - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar - Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1594:2013

DIN EN ISO 3183:2020-02 Erdöl- und Erdgasindustrie - Stahlrohre für Rohrleitungstransportsysteme (ISO 3183:2019); Deutsche Fassung EN ISO 3183:2019

DIN EN 10216-5:2021-06 Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 5: Rohre aus nichtrostenden Stählen; Deutsche Fassung EN 10216-5:2021

DIN EN 10217-5:2019-08 Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 5: Unterpulvergeschweißte Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen; Deutsche Fassung EN 10217-5:2019

SN EN 10220:2003-1 Nahtlose und geschweißte Stahlrohre - Allgemeine Tabellen für Maße und längenbezogene Masse; Schweizer Fassung SN EN 10220:2003

SN EN ISO 1127:1992 Nichtrostende Stahlrohre – Masse, Grenzabmasse und längenbezogene Masse (ISO 1127:1192)

SN EN 10088-1 Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle; Deutsche Fassung

Literatur

[L1] G. Cerbe et al., Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung – Gasverteilung – Gasverwendung, 8. Auflage

[L2] J. Mischner, „Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen,“ gwf Gas + Energie, pp. 44-63, 5/2021

[L3] Eric W. Lemmon, Ian H. Bell, Marcia L. Huber, and Mark O. McLinde“, "Thermophysical Properties of Fluid Systems" in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD,

20899, <https://doi.org/10.18434/T4D303>, (retrieved September 26, 2022).,
<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

[L4] W. Huinen, Onderzoek Technische Aspecten van Waterstof, Bilfinger Tebodin, Schiedam,
Documentnummer 53052.01-1917001, Rev. B [2019]

Internet

<https://www.soluforce.com/product-overview/pipe-types/hydrogen-tight.html>

[Mannesmann Linepipe - L290](#)

[L290NE / X42NE | Mannesmann Line Pipe GmbH \(mannesmann-linepipe.com\)](#)

<https://www.kindlimann.ch/de/>

<https://www.kohler.ch/>

Gruner AG

Christian Gally
Projektleiter Energietechnik

Markus Butz
Abteilungsleiter Energietechnik

Anhang A – Strömungsgeschwindigkeit

Die Quelle zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten, welche zur Ermittlung der Transportleistung verwendet wird, ist ein Fachbericht von Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Jens Mischner (VDI) "Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen". Für detailliertere Erklärungen zu den Annahmen zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten sei auf Prof. Mischners Fachbericht verwiesen, sowie die dort erwähnten Quellenangaben.

Die Transportleistung P_t ermittelt sich als Produkt aus volumetrischer Energiedichte ω in $\frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$ und Volumenfluss $\dot{V}$ in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

$$P_t = \omega \dot{V}$$

Die volumetrische Energiedichte ω ist das Produkt aus massenspezifischer Energiedichte (33.3 kW/kg) und der Dichte (in kg/m^3) von Wasserstoff. Der Volumenfluss $\dot{V}$ ermittelt sich als Produkt aus Rohrrinnenquerschnittsfläche A_{innen} in m^2 und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit $\frac{v_{\text{max}}}{2}$.

$$\dot{V} = A_{\text{innen}} \frac{v_{\text{max}}}{2}$$

Die maximale Grenzgeschwindigkeit v_{max} ermittelt sich über die Materialkonstante C ($\sqrt{\text{N}}/\text{m}$) und die Dichte ρ (kg/m^3) wie folgt:

$$v_{\text{max}} = \frac{C}{\sqrt{\rho}}$$

C_f -Faktor für Kunststoff bei 10 °C: $C_f = 200 \frac{\sqrt{\text{N}}}{\text{mm}}$.

C_f -Faktor für Stahl bei 10 °C: $C_f = 125 \frac{\sqrt{\text{N}}}{\text{mm}}$.

Wie oben beschrieben sind die maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten dichte- bzw. druckabhängig. Sie können in Abhängigkeit des Drucks unter isothermen Bedingungen aus den nachfolgenden Kurven entnommen werden:

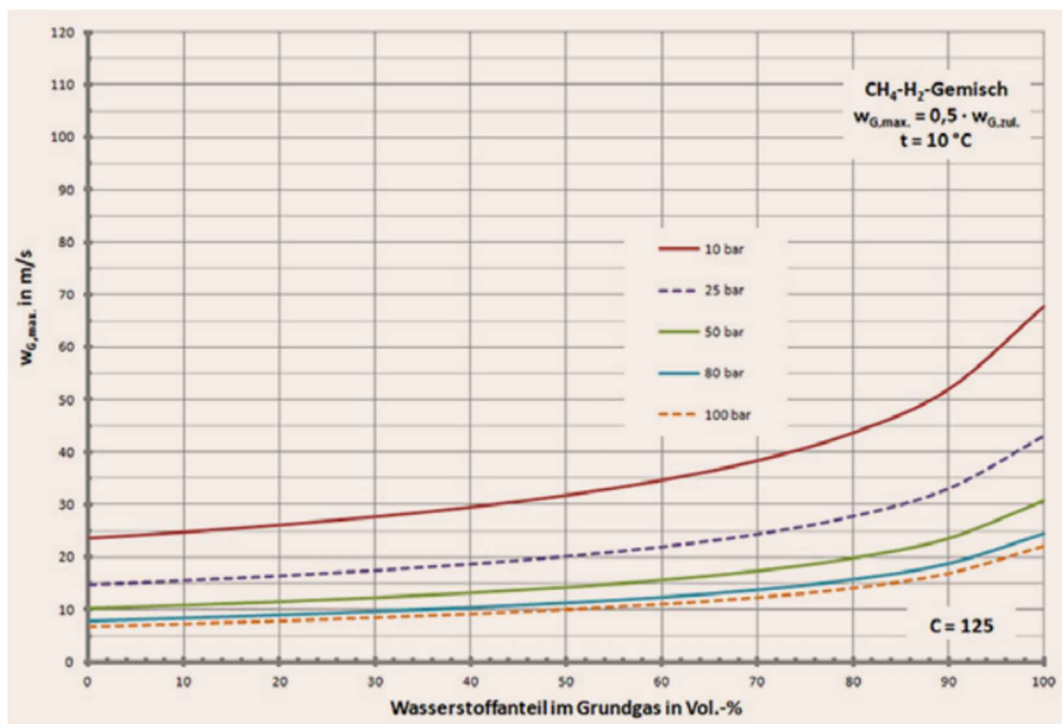


Abbildung 19 Maximale Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Drücken (zwischen 10 und 100 bar) in Stahlleitungen für Wasserstoff (100%) und Gemische aus Wasserstoff und Erdgas (C=125)

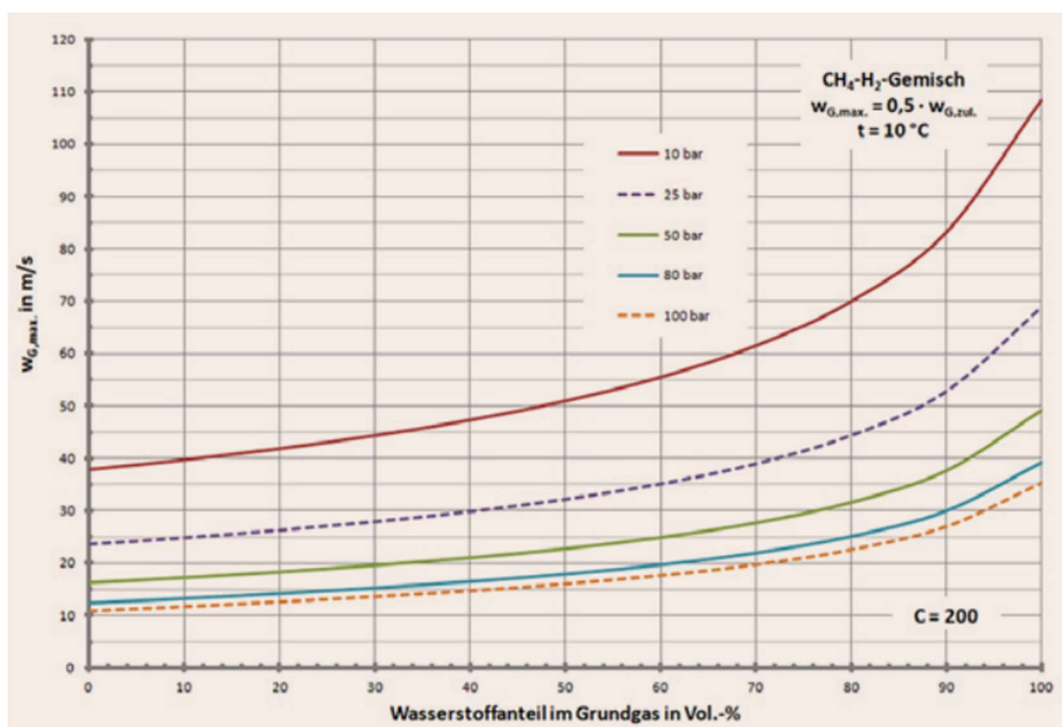
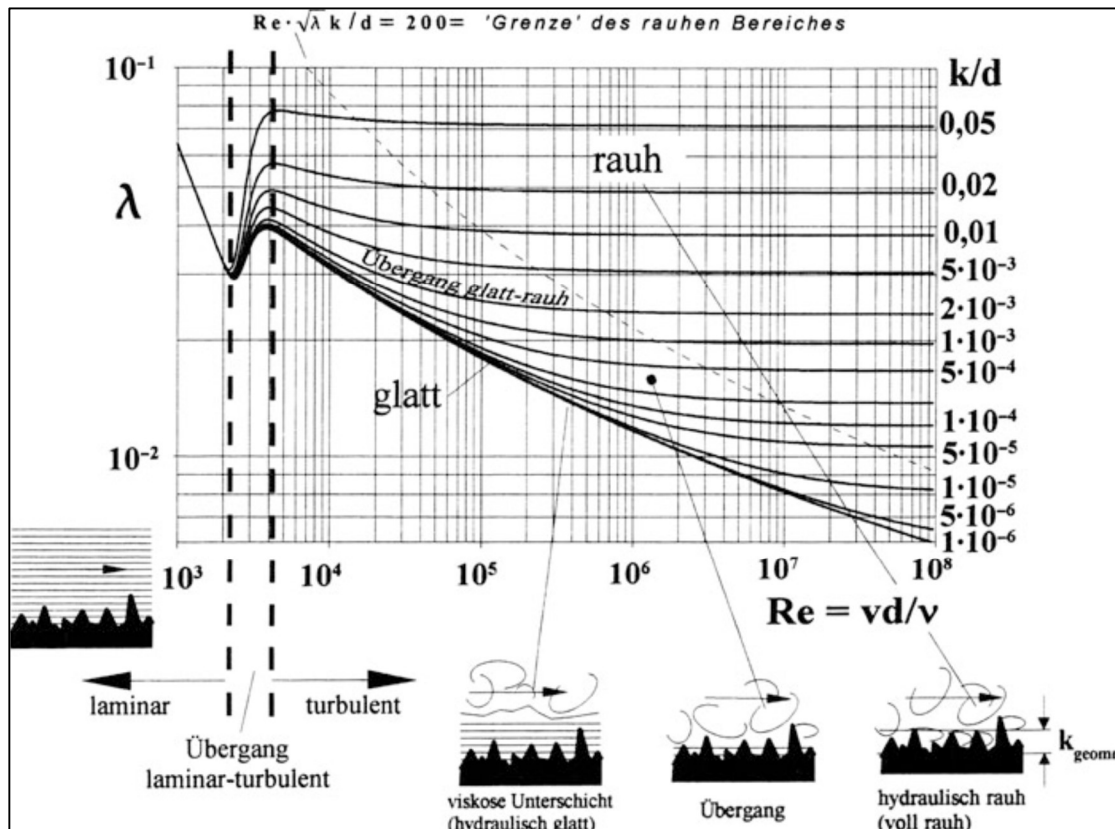


Abbildung 20 Maximale Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Drücken (zwischen 10 und 100 bar) in Kunststoffleitungen für Wasserstoff(100%) und Gemischen aus Wasserstoff und Erdgas; (C=200)

Anhang B

Ermittlung der Rohrreibezahl λ

Die Rohrreibezahl λ ist dem bekannten Moody-Diagramm zu entnehmen und hängt von unterschiedlichen Parametern wie der Re -Zahl, der Rauigkeit k und dem Rohrrinnendurchmesser D_i ab. Nachfolgende Abbildung zeigt diese Zusammenhänge anschaulich.



Quelle: Schröder, R., Zanke, U.: Technische Hydraulik. Ein Kompendium für den Wasserbau. 2. Aufl.

Springer, Berlin/Heidelberg/New York (2003)

Bestimmung der Reynoldszahl Re mittels Geschwindigkeit v , Rohrrinnendurchmesser D_i , dynamische Viskosität η und Dichte ρ

$$Re = \frac{v D_i \rho}{\eta}$$

Rauigkeit von Leitungsrohren

Kennwerte

Rohrrauigkeiten von Stahlrohren gezogen		
Rauigkeit (mm)	min.	max.
neu [1]	0,040	0,100
längerer Gebrauch gereinigt [1]	0,150	0,200
typische Walzhaut [3]	0,020	0,060
handelsüblich verzinkt [3]	0,100	0,160
sauber verzinkt [3]	0,070	0,100
bitumiert	0,050	0,100
gebeizt [3]	0,030	0,040
ungebeizt [3]	0,030	0,060
rostfreier Stahl [3]	0,080	0,090
mäßig verrostet leichte Verkrustungen [1]	0,150	0,400
Rostnarben	0,150	0,200
mittelstarke Verkrustung	0,150	0,150
starke Verkrustung [1]	1,000	3,000
mehrjähriger Betrieb	0,150	0,300
genietet [1]	0,500	10,00 k _{mit} 0,900

Rohrrauigkeiten von geschweißten Stahlrohren	min.	max.
neu [1]	0,050	0,100
typische Walzhaut [3]	0,040	0,100
neu bitumiert [1]		0,050
zementiert [3]		0,180
gebraucht u. gereinigt [1]	0,150	0,200
gleichmäßig verrostet		0,400
leichte Verkrustung [1]	1,000	1,500

starke Verkrustung [1]	2,000	4,000
galvanisiert Belüftungsrohre [3]		0,008

[1] VDI-Wärmeatlas 2006

[2] Vismann: Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln

[3] C. Lang, N. Stache: Hydraulik von Rohrsystemen

Für hier gemachte Druckverlustberechnungen wurde ein k-Wert von 0.2 eingesetzt.

Tabelle 27 Ermittlung Druckverlust

Wasserstoff T = 15 °C kompressibel						
Druck p	Volumenstrom $\dot{V}$	DN	Geschwindigkeit v	Re-Zahl	Rohrreibungszahl $\lambda_{\text{üb}}$	Druckverlust Δp
[bar]	[m ³ /h]	-	[m/s]	-	-	[mbar/m]
40	274.0	50	34.5	689014 (turbulent)	0.0170	6.274
		100	8.74	346797 (turbulent)	0.0195	0.232
750	21.41	50	2.70	539035 (turbulent)	0.0178	0.515
		100	0.68	271309 (turbulent)	0.0205	0.019

Anhang C – Dimensionierung Leitungsrohre

Leitungsrohre für Erdgas und andere gasförmige Medien – EN 1594:2013

Man ermittelt die Mindestwandstärke aus der der EN 1594:2013 Gas Infrastruktur - Rohrleitungen mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar – Funktionale Anforderungen anhand folgender Formel.

$$t_{\min} = \frac{DP * D}{20 * f_0 * R_{t0,5(\theta)}}$$

$t_{\min}$ die berechnete Mindestwanddicke in mm

DP der Auslegungsdruck in bar

D der Rohraußendurchmesser in mm

$R_{t0,5(\theta)}$ die Dehngrenze in MPa (bei 0,5 % gesamter Dehnung)

$f_0 = 0.72$ (Nutzungsgrad) dimensionslos

- erdverlegte Abschnitte außerhalb von Stationen $\leq 0,72$;
- Abschnitte in dauerhaft abgestützten Tunnel $\leq 0,72$;

- Stationen $\leq 0,67$, unter Berücksichtigung der ergänzenden Anforderungen an die Wanddicke in 7.9.2

Die Berechnungen werden mit einem Nutzungsgrad $f_0 = 0.5$ durchgeführt.

Mit diesem Nutzungsgrad muss keine Bruchmechanische Betrachtung nach SNEN 1594 durchgeführt werden.

Tabelle 28 Bemessung der Rohrleitungen und resultierende Innendurchmesser für die Bemessung nach EN 1594

	P235 TR1 / P355					Di
	Tmin	Do	DP	Rt0.5	f	
DN 25	0.6	33.7	40	235	0.5	32.55
	10.8	33.7	750	235	0.5	12.19
	0.4	33.7	40	355	0.5	32.94
	7.1	33.7	750	355	0.5	19.46
	0.4	33.7	40	235	0.72	32.90
	7.5	33.7	750	235	0.72	18.76
	0.3	33.7	40	355	0.72	33.17
	4.9	33.7	750	355	0.72	23.81
DN 32	0.7	42.4	40	235	0.5	40.96
	13.5	42.4	750	235	0.5	15.34
	0.5	42.2	40	355	0.5	41.25
	9.0	42.4	750	355	0.5	24.48
	0.5	42.4	40	235	0.72	41.40
	9.4	42.4	750	235	0.72	23.61
	0.3	42.4	40	355	0.72	41.74
	6.2	42.4	750	355	0.72	29.96
DN 40	0.8	48.3	40	235	0.5	46.66
	15.4	48.3	750	235	0.5	17.47
	0.5	48.3	40	355	0.5	47.21
	10.2	48.3	750	355	0.5	27.89
	0.6	48.3	40	235	0.72	47.16
	10.7	48.3	750	235	0.72	26.89
	0.4	48.3	40	355	0.72	47.54
	7.1	48.3	750	355	0.72	34.13
DN 50	1.0	60.3	40	235	0.5	58.25
	19.2	60.3	750	235	0.5	21.81
	0.7	60.3	40	355	0.5	58.94
	12.7	60.3	750	355	0.5	34.82
	0.7	60.3	40	235	0.72	58.87
	13.4	60.3	750	235	0.72	33.57
	0.5	60.3	40	355	0.72	59.36
	8.8	60.3	750	355	0.72	42.61

Tabelle 29 Mindestwandstärken für Erdverlegte Leitungen

Tabelle 1 — Kleinste Bestellwanddicken

D (mm)	$\leq 114,3$	168,3	219,1	273	323,9	355,6	406,4	508	610	> 610
T (mm)	3,2	4,0	4,5	5,0	5,6	5,6	6,3	6,3	6,3	1 % D

Bemessung von Leitung mit L290 NE Stahl.

Tafel 5.5 Sicherheitsbeiwert S und Nutzungsgrad f_0 nach DVGW-G 463

Stahlsorte	Sicherheitsbeiwert S	Nutzungsgrad f_0
L245NB/L245MB	1,50	0,67
L290NB/L290MB	1,50	0,67
L360NB/L360MB	1,55	0,65
L415NB/L415MB	1,60	0,63
L450MB	1,60	0,63
L485MB	1,60	0,63
L555MB	1,60	0,63

Auszug aus:

Cerbe, G., Lendt B., Grundlagen der Gastechnik, 8., vollständig überarbeitete Auflage, Hanser Verlag, Kapitel 5, S. 227.

Charakteristisch für die EN 1594 ist, dass die Festigkeitsberechnung des Materials auf dem $R_{t0.5}$ -Wert und nicht auf dem R_e oder $R_{p0.2}$ -Wert beruht. Der $R_{t0.5}$ -Wert wird bei Stählen für den Druckbehälterbau (Kennbuchstabe "P") und Leitungsrohre (Kennbuchstabe "L") verwendet.

Tabelle 30 Bemessung der Leitungen nach EN 1594

EN 1594	P235 TR1				
	t_{min}	D_o	DP	$R_{t0.5}$	f
	18.6	60.3	750	235	0.72
	L290 NE				
	12.0	48.3	750	290	0.72

Rohre aus rostfreiem Edelstahl – EN 13480-3

Nicht-rostende Edelstähle (z.B. X2CrNi17-12-2) sind legiert. Sie werden aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit für den Rohrleitungsbau ausgewählt und genauer untersucht.

Man ermittelt bei nichtrostenden Edelstählen die Wandstärke gemäss EN 13480-3:2022. Diese Berechnung von dem Verhältnis D_o/D_i abhängig.

Für $D_o/D_i \leq 1.7$ gilt folgende Formel zur Berechnung der Wandstärke t (6.1-1):

$$t = \frac{p_c D_o}{2 f z + p_c}$$

Für $D_o/D_i > 1.7$ gilt folgende Formel zur Berechnung der Wandstärke t (6.1-2):

$$t = \frac{D_o}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{f z - p_c}{f z + p_c}} \right)$$

D_o : Aussendurchmesser in mm

t : Wandstärke in mm

p_c : Berechnungsdruck in MPa

f : Auslegungsspannung in MPa

z : Schweißnahtfaktor (dimensionslos)

Die folgenden Schweißnahtfaktoren sind anzuwenden:

- Bei Schweißverbindungen, die lediglich Sichtprüfungen unterzogen werden, $z = 0,7$;
- Bei Schweißverbindungen, die zufälligen zerstörungsfreien Prüfungen unterzogen werden, $z = 0,85$;
- Bei Schweißverbindungen, die zu 100 % durch zerstörungsfreie Prüfungen untersucht werden, $z = 1,0$.

Annahmen:

f = $R_{p1.0t}/1.5$, Bruchdehnung $A > 35$ %, s. Formel (5.2.2-1) der EN 13480-3

$R_{p1.0}$ = $R_{p1.0t}$

$R_{p1.0t}$ = 230 MPa aus EN 10216-5 (Tabelle 6)

z = 0.7 (Worstcase) aus Kapitel 4.5 der EN 13480-3

Verlegung von zwei parallelen Rohrleitungen bei 750 bar

Nachfolgende Tabelle zeigt die ermittelten Wandstärken gemäss EN 1594.

Grün hervorgehoben → Anforderung für 30 MW erfüllt.

Rot hervorgehoben → Anforderung für 30 MW nicht erfüllt.

Verwendet werden könnte demnach ein Stahlrohr aus P355 mit DN 32 ($D_o = 42.4$ mm) mit einer Wandstärke von 8.6 mm.

Alternativ könnte man einen L290 NE mit DN 32 ($D_o = 42.4$ mm) mit einer Wandstärke von 10.6 mm oder ein L415 mit DN 25 ($D_o = 33.7$ mm) mit einer Wandstärke von 5.9 mm.

Beim rostfreien Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 würde ein schmalerer Leitungsquerschnitt gemäss EN 1380-3 keine Verbesserung von DN 65 auf DN 50 bringen.

Tabelle 31 Leitungsdimensionierung für zwei Parallele Leitungen

Do/Di > 1.7					
Edelstahl (X2CrNiMo17-12-2)					
p_c [MPa]	f [MPa]	Z [-]	D_o [mm]	t_{min} [mm]	D_i
75	150	0.7	76.1	22.5	31.1
75	150	0.7	60.3	17.8	24.6
75	150	0.7	42.4	12.5	17.3
75	150	0.7	33.7	10.0	13.8

Anhang D – Bild Soluforce H2T- Leitung

Abbildung 21 H2T - Leitung Soluforce



Quelle :

<https://www.soluforce.com/content/dam/pipelife/soluforce/marketing/general/brochures/soluforce-hydrogen-tight-h2t-brochure.pdf>