



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Energieforschung und Cleantech

**Schlussbericht vom 20. Oktober 2020**

---

# **AASD – Abdichtung und Auslegung von Speicherhohlräumen für Druckluftspeicher- kraftwerke**

---



**Datum:** 20. Oktober 2020

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Ko-Finanzierung:**

Amberg Engineering AG  
Trockenloostrasse 21  
8105 Regensdorf-Watt

ETH Zürich  
Rämistrasse 101  
8092 Zürich

Sika Technology AG  
Industriestrasse 26  
6060 Sarnen

Dr. Giw Zanganeh  
Via Generoso 7  
6900 Lugano

**Subventionsempfängerin:**

ETH Zürich, Energy Science Center  
Sonneggstrasse 28, 8092 Zürich  
[www.esc.ethz.ch](http://www.esc.ethz.ch)

**Autoren:**

Felix Amberg, Amberg Engineering AG, [famberg@amberg.ch](mailto:famberg@amberg.ch)  
Prof. Georgios Anagnostou, ETH Zürich, [georg.anagnostou@igt.baug.ethz.ch](mailto:georg.anagnostou@igt.baug.ethz.ch)  
Yves Boissonnas, Sika Europe Management AG, [boissonnas.yves@ch.sika.com](mailto:boissonnas.yves@ch.sika.com)  
Alice Brauchart, ETH Zürich, [alice.brauchart@igt.baug.ethz.ch](mailto:alice.brauchart@igt.baug.ethz.ch)  
Dr. Andreas Haselbacher, ETH Zürich, [haselbac@esc.ethz.ch](mailto:haselbac@esc.ethz.ch)  
Dr. Martin Lonschien, Sika Technology AG, [lonschien.martin@ch.sika.com](mailto:lonschien.martin@ch.sika.com)  
Dr. Erich Pimentel, ETH Zürich, [erich.pimentel@igt.baug.ethz.ch](mailto:erich.pimentel@igt.baug.ethz.ch)  
Dr. Giw Zanganeh, ALACAES, [giw.zanganeh@alacaes.com](mailto:giw.zanganeh@alacaes.com)

**BFE-Projektbegleitung:**

Roland Brüniger, [roland.brueeniger@brueniger.swiss](mailto:roland.brueeniger@brueniger.swiss)  
Dr. Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501932-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Laboruntersuchungen bei 40°C und bis zu 100 bar haben gezeigt, dass bestehende Sika Abdichtungsfolien ausreichend dicht sind, um Luftverluste aus den Speicherhöhlräumen von Druckluftspeicherkraftwerken klein genug zu halten und damit die Effizienz und Kapazität der Speicherkraftwerke sicherzustellen. Weitere Laboruntersuchungen haben klare Hinweise geliefert, dass die Abdichtungsfolien bei Drücken von bis zu 100 bar vor Unebenheiten geschützt werden müssen, um ein Durchbohren der Folien zu vermeiden. Dieser Schutz kann durch ein mehrschichtiges Abdichtungssystem bewerkstelligt werden. Drei Abdichtungssysteme wurden unter Berücksichtigung der Anbringung im Speicherhohlraum und der Wartung entwickelt. Mögliche Konzepte zur Ortung von Leckagen wurden angedacht. Experimentelle Untersuchungen zur Kompatibilität der Materialien in den Abdichtungssystemen, der Anbringung der Abdichtungssysteme und deren Dichtheit sollten in möglichen Folgeprojekten durchgeführt werden. Im Weiteren wurden die Auslegung der Maschinenhalle und der Speicherhöhlräume in Druckluftspeicherkraftwerken unter geomechanischen Gesichtspunkten untersucht. Für ein Druckluftspeicherkraftwerk mit 500 MWh Kapazität wurden drei Hohlraumvarianten (Schacht, Kaverne, Kaverne/Tunnel) dimensioniert. Anhand geologischer Karten wurden im Grimselgebiet vier Standorte eines Druckluftspeicherkraftwerks genauer studiert. Die Kosten für den Bau der Maschinenhalle, der Speicherhöhlräume und der Zugänge werden auf 69 bis 95 MCHF geschätzt.

## Summary

Laboratory investigations at 40°C and at up to 100 bar have shown that existing Sika sealing sheets are sufficiently tight to keep air losses from cavities in compressed air storage plants small enough and thereby ensure their efficiency and capacity. Additional laboratory investigations have delivered clear evidence that at pressures of up to 100 bar, the sealing sheets must be protected against roughness to prevent them from being perforated. The protection can be achieved by a multilayer sealing system. Three sealing systems were developed by considering their installation and maintenance in the cavern. Feasible concepts for the detection of leakages were elaborated. Experimental investigations of the compatibility of the materials in the sealing systems, their installation, and their tightness should be conducted in possible follow-up projects. Furthermore, the layout of the machine hall and the cavities in compressed air storage plants were investigated from a geomechanical perspective. For a compressed air storage plant with a capacity of 500 MWh, three cavity variants (shaft, cavern, cavern/tunnel) were dimensioned. Four plant locations in the Grimsel area were investigated in detail using geological maps. The costs for constructing the machine hall, the cavities and their access points were range from 69 to 95 MCHF.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>7</b>
1.1	Ausgangslage und Hintergrund .....	7
1.2	Ziele des Projekts .....	8
<b>2</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....</b>	<b>9</b>
2.1	Anforderungen an Dichtigkeit des Speicherhohlraums.....	9
2.1.1	Abschätzungen zur erforderlichen Dichtigkeit.....	9
2.1.2	Thermische Simulationen des Abdichtungssystems .....	10
2.1.3	Resultate .....	11
2.2	Anforderungen an die Abdichtung und Untersuchungen von bestehenden Systemen.....	13
2.2.1	Auswahl Abdichtungssysteme .....	13
2.2.2	Luftdichtheit/Luftdiffusion.....	14
2.2.3	Laborergebnisse bei 40°C und zwischen 0 und 10 bar Luft .....	15
2.2.4	Laborergebnisse bei 40°C und bis zu 100 bar .....	16
2.2.5	Grenzwertbestimmung Dichtheit .....	17
2.2.6	Ergänzende Untersuchungen bei 40°C und 10 bar .....	17
2.3	Anbringen von Abdichtungen in Speicherhohlräumen .....	18
2.3.1	Potentielle Systeme .....	18
2.3.2	Installation der Abdichtung.....	19
2.3.2.1.	Befestigung der Abdichtung.....	19
2.3.2.2.	Schichtaufbau .....	20
2.3.2.3.	Elemente des Schichtaufbaus .....	23
2.3.2.4.	Schichtaufbau der drei vorgeschlagenen Systeme .....	24
2.3.2.5.	Vergleich der Systeme .....	27
2.3.2.6.	Kosten .....	28
2.3.2.7.	Qualitätskontrolle .....	28
2.3.3	Leitungen und Installationen in der Druckzone .....	29
2.3.4	Inspektion und Unterhalt.....	29
2.3.5	Identifikation und Ortung von Leckagen.....	29
2.3.5.1.	Visuelle Ortung .....	30
2.3.5.2.	Ortung mittels farbigem Rauch.....	30
2.3.5.3.	Akustische Ortung.....	30
2.3.5.4.	Thermographie .....	30
2.3.6	Reparatur von Leckagen .....	30
2.3.7	Ausblick .....	31
2.4	Konstruktion von Speicherhohlräumen .....	31
2.4.1	Geometrische Vorgaben .....	31
2.4.1.1.	Hochdruckhohlraum .....	32
2.4.1.2.	Niederdruckhohlraum und Maschinenkaverne .....	34
2.4.1.3.	Zugangsstollen und Lufteinzugs-/Ablasstollen .....	35
2.4.2	Gebietseingrenzung für die Standortwahl .....	37
2.4.3	Geotechnische und rohbautechnische Beurteilung und Vordimensionierung.....	41
2.4.3.1.	Rissbildung im Fels .....	41
2.4.3.2.	Rissbildung im Schichtaufbau .....	45





2.4.3.3.	Sicherheit gegen ein Aufbrechen .....	46
2.4.3.4.	Vordimensionierung der Betonpfropfen .....	48
2.4.4	Selektion von potentiellen Standorten .....	52
2.4.4.1.	Variantenanalyse .....	52
2.4.4.2.	Kostenschätzung Hohlraumherstellung .....	54
<b>3</b>	<b>Weiteres Vorgehen .....</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>60</b>
5.1	Produktdatenblätter.....	60
5.2	Legende zur Geologischen Karte in Abbildung 23 .....	82
5.3	Auslegung Variante «Schacht Nord».....	83
5.4	Auslegung Variante «Kaverne Nord» .....	84
5.5	Auslegung Variante «Kaverne-Tunnel Nord» .....	85
5.6	Auslegung Variante «Schacht Süd».....	86
5.7	Auslegung Variante «Kaverne Süd» .....	87
5.8	Auslegung Variante «Kaverne-Tunnel Süd» .....	88



## Abkürzungsverzeichnis

DLSKW	Druckluftspeicherkraftwerk
GIS	Geoinformationssystem
HDHR	Hochdruckhohlraum
HP	High pressure
HPC	High-pressure compressor (Hochdruckkompressor)
HPT	High-pressure turbine (Hochdruckturbine)
LP	Low pressure
LPC	Low-pressure compressor (Niederdruckkompressor)
LPT	Low-pressure turbine (Niederdruckturbine)
MK	Maschinenkaverne
NDHR	Niederdruckhohlraum
NEAT	Neue Eisenbahn-Alpentransversale
PVC	Polyvinylchlorid
TBM	Tunnelbohrmaschine
TES	Thermal-energy storage (Wärmespeicher)
TPO	Thermoplastische Polyolefine



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Druckluftspeicherkraftwerke (DLSKW) sind in der Schweiz bereits in mehreren Projekten untersucht worden:

1. BFE/ALACAES (abgeschlossen Ende 2016) [1]: ALACAES baute in einem stillgelegten NEAT-Schutterstollen bei Pollegio die weltweit erste Pilotanlage eines adiabatischen DLSKW. Aus Kostengründen war die Pilotanlage nicht mit einer Turbine ausgestattet. Das Hauptziel der mit der Anlage durchgeführten Versuche war es, den im Tunnel konstruierten Speicherhohlraum – der nicht mit einer Membran ausgekleidet war – und den Wärmespeicher unter zyklischen Bedingungen zu testen. Wegen der fehlerhaften Auslegung der Betonpropfen konnten nur Drücke von 8 bar anstelle der vorgesehenen 33 bar erreicht werden. Dadurch konnte die Dichtigkeit des Speicherhohlraums nicht unter relevanten Bedingungen untersucht werden.
2. SNF NFP 70 (abgeschlossen Ende 2018) [2] [3] [4] [5]: Theoretische Untersuchungen von DLSKW Anlagen mit kombiniert sensiblen/latenten Wärmespeichern mit Temperaturen bis zu 566°C unter den Gesichtspunkten der Technik, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Durch Beteiligung an den Pilotversuchen von ALACAES konnten die technischen Vorhersagen validiert werden [6] [7]. Ein wichtiges Resultat war, dass die simulierten Effizienzen von 65-75% gut mit den (geschätzten) Effizienzen von 63-74% aus den Versuchen übereinstimmten.<sup>1</sup>
3. BFE G2G (abgeschlossen Ende Mai 2019): Durch die Beteiligung von MAN Energy Solutions AG konnten die im SNF Projekt entwickelten Anlagenmodelle erweitert werden, um den transienten Betrieb von DLSKW Anlagen genauer abzubilden. Damit werden die durch den Betrieb der Kompressoren und Turbinen eingeführten Zeitskalen und Energieverbräuche in den Simulationen berücksichtigt und verlässlichere Vorhersagen der Effizienz unter realistischen Einsatzbedingungen ermöglicht. Für Anlagen mit einer Maximaltemperatur von 320°C<sup>2</sup> wurde gezeigt, dass Effizienzen von 75% erreichbar sind.
4. SCCER (wird Ende Dezember 2020 abgeschlossen): Abklärungen haben gezeigt, dass die Benutzung von ausrangierten Armeekavernen aus mehreren Gründen weniger sinnvoll ist als ursprünglich angenommen wurde. Im Weiteren konnte durch Simulationen mit einem einfachen DLSKW Anlagenmodell im Schweizer Elektrizitätsnetz von 2025 gezeigt werden, dass bezüglich der Wirtschaftlichkeit grosse Unterschiede zwischen Anlagestandorten bestehen und dass die Teilnahme von DLSKW Anlagen im Spotmarkt allein nicht profitabel sein wird. Im schweizerischen Sekundärregelmarkt scheint ein DLSKW jedoch profitabel sein zu können. Genauere Untersuchungen der Profitabilität mit dem im BFE G2G Projekt erweiterten Anlagenmodell sind noch im Gang.

Das AASD Projekt grenzt sich von den oben beschriebenen Projekten dadurch ab, dass es sich hauptsächlich auf die Dichtigkeit und die Konstruktion von Speicherhöhlräumen fokussiert. Die Wirtschaftlichkeit wird nur insofern betrachtet, als sie durch die Abdichtung und die Konstruktion von Speicherhöhlräumen tangiert wird.

---

<sup>1</sup> Die Effizienzen mussten geschätzt werden, weil die Pilotanlage keine Turbine hatte. Wo möglich wurden bei der Schätzung Messwerte benutzt.

<sup>2</sup> Die im Vergleich zum SNF NFP 70 Projekt niedrigeren Temperaturen sind dadurch bedingt, dass im BFE G2G Projekt bestehende Turbomaschinen von MAN Energy Solutions AG berücksichtigt wurden.

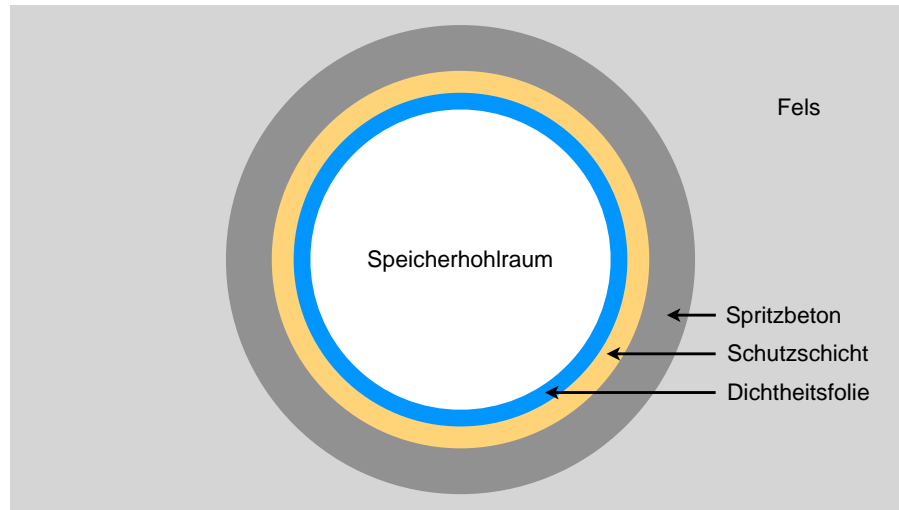


Abbildung 1: Schematische Darstellung des im AASD Projekt untersuchten Abdichtungskonzepts.

Um die Dichtigkeit von Speicherhöhlräumen über Jahrzehnte zu gewährleisten, wird es auch bei gutem Gestein notwendig sein, Speicherhöhlräume abzudichten. Es gab/gibt mehrere Projekte, in welchen Abdichtungen für Speicherhöhlräume untersucht wurden [8] [9] [10] [11] [12] [13]. Eine Lösung, die sich sowohl in praxisnahen Experimenten bewährt hat, als auch wirtschaftlich ist, scheint es jedoch noch nicht zu geben. Das Abdichtungskonzept, das im AASD Projekt untersucht wird, ist in Abbildung 1 dargestellt.

## 1.2 Ziele des Projekts

Es werden folgende Aspekte von Speicherhöhlräumen im Felsen für den Einsatz in DLSKW untersucht:

1. Mittels Simulationen wird bestimmt, wie viel Luft ein Speicherhohlraum pro Tag verlieren darf, um trotzdem noch gute Effizienzen und Speicherkapazitäten zu erreichen. Die grundlegende Hypothese ist, dass ein Speicherhohlraum mit einem «einfachen» Abdichtungskonzept und «kleinen» Druckverlusten kostengünstiger sein wird als ein Speicherhohlraum mit einem ausgeklügelten Abdichtungskonzept und null Druckverlust. Schlussendlich ist die Schlüsselfrage, wie gering die Druckverluste sein müssen damit die Wirtschaftlichkeit nicht gefährdet wird. Damit verbunden sind auch maximal zulässige Leckagemassenströme infolge von Undichtheiten, die während dem Bau oder Betrieb in der Abdichtungsfolie entstanden sind.
2. Es wird untersucht, ob existierende Abdichtungssysteme eine genügende Abdichtung garantieren können, und falls nicht, ob und mit welchem Aufwand sie entwickelt und hergestellt werden können.
3. Es wird untersucht, wie ein Abdichtungssystem in einem Speicherhohlraum eingebaut werden muss, ohne während dem Bau oder dem Betrieb der Anlage beschädigt zu werden.
4. Schlussendlich wird auch, für den spezifischen Fall der Schweiz, der optimale Bau des Speicherhohlraums im Felsen aus geomechanischer Hinsicht untersucht (Stollen, Schacht oder Kaverne; Standort; Abstand von der Oberfläche; Einfluss auf Kosten, etc.).



## 2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### 2.1 Anforderungen an Dichtigkeit des Speicherhohlraums

#### 2.1.1 Abschätzungen zur erforderlichen Dichtigkeit

Zu Beginn des Projekts wurden die erforderliche Dichtigkeit des Speicherhohlraums analytisch und numerisch abgeschätzt. Die Abschätzungen modellierten den Massenstrom der entweichenden Luft wie folgt:

$$\dot{m}_l = \frac{\rho A k}{\mu d} (p - p_{\text{ref}}) \quad (1-1)$$

wobei  $\rho$  die Dichte der Luft im Hohlraum ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A$  die Oberfläche des Hohlraums ( $\text{m}^2$ ),  $k$  die Permeabilität der Dichtheitsfolie ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  die dynamische Viskosität der Luft im Hohlraum ( $\text{kg}/\text{ms}$ ),  $d$  die Dicke der Dichtheitsfolie ( $\text{m}$ ),  $p$  der Druck der Luft im Hohlraum ( $\text{Pa}$ ) und  $p_{\text{ref}}$  ein Referenzdruck ( $\text{Pa}$ ) sind. Der Ansatz (1-1) beruht auf der Annahme, dass die Dichtheitsfolie als ein poröses Medium modelliert werden kann. Es stellte sich heraus, dass diese Annahme den physikalischen Mechanismus hinter den Druckverlusten nicht korrekt wiedergibt: Wie in Abschnitt 2.2.2 erklärt, entstehen Druckverluste für die in diesem Projekt untersuchten Dichtheitsfolien nicht durch Transport durch Poren, sondern durch Adsorption und Desorption.

Vor der Anpassung des Modellansatzes wurden mit dem in [14] beschriebenen numerischen Anlagenmodell Simulationen durchgeführt, um einen ersten Anhaltspunkt über die tolerierbaren Druckverluste zu erhalten. Diese Simulationen wurden für die in Abbildung 2 dargestellte Anlagenkonfiguration mit zwei Hohlräumen und je zwei Kompressions- und Expansionsstufen durchgeführt.<sup>3</sup> Das Leervolumen des

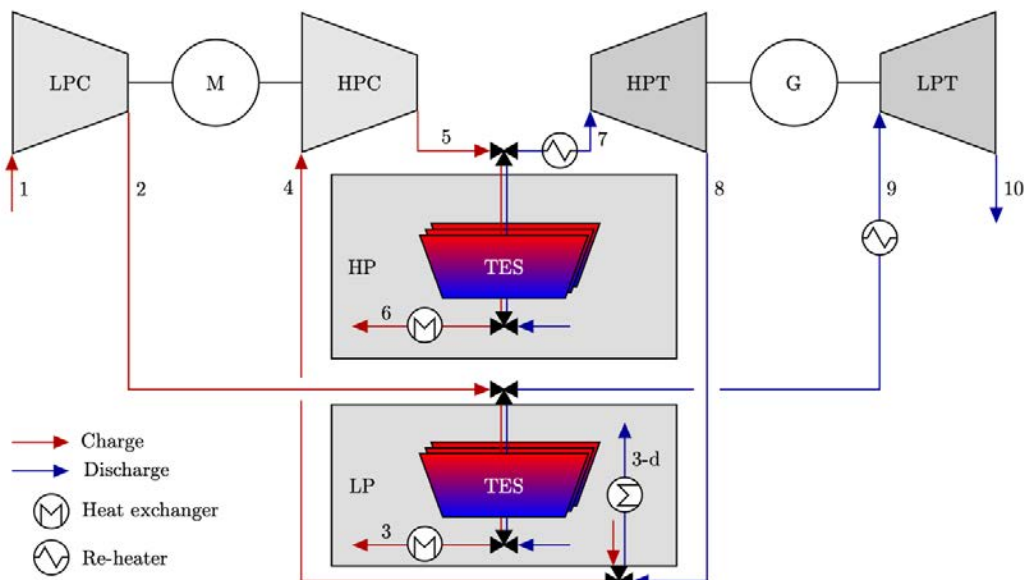


Abbildung 2: Konfiguration der Druckluftspeicheranlage mit zwei Kompressions- und Expansionsstufen und Hohlräumen. Legende: LPC = low-pressure compressor (Niederdruckkompressor). M = Motor. HPC = high-pressure compressor (Hochdruckkompressor). HP = high-pressure (cavern) (Hochdruckhohlraum, HDHR). LP = low-pressure (cavern) (Niederdruckhohlraum, NDHR). HPT = high-pressure turbine (Hochdruckturbine). G = Generator. LPT = low-pressure turbine (Niederdruckturbine). TES = thermal-energy storage (Wärmespeicher).

<sup>3</sup> Diese Anlagenkonfiguration wurde auch bereits in den SCCER Phase II und BFE AA-CAES-G2G [31] Projekten untersucht.



Hochdruckhohlraums beträgt 177'000 m<sup>3</sup>. Während dem quasi-stationären Betrieb bewegt sich der Druck im Hochdruckhohlraum zwischen 70 und 100 bar. Während der Lade- und Entladephasen, deren Dauer dynamisch bestimmt wurde, um die genannten Druckextrema zu erreichen, strömt Luft mit 200 kg/s in den Hochdruckhohlraum resp. aus ihm heraus. Die Simulationen zeigten, dass ein Massenverlust von 1 kg/s das Verhalten der Anlage zu vertretbaren Effizienzverlusten führt, siehe Tabelle 1.<sup>4</sup> Da dieser Wert den in den ersten Versuchen ermittelten Massenverlust um mehrere Grössenordnungen überschreitet, siehe Abschnitt 2.2.5, wurde auf eine verfeinerte Modellierung der Adsorptions- und Desorptionvorgänge verzichtet. Weil die Dichtheit der Abdichtungsbahn mit der Temperatur stark abnimmt, wurde stattdessen der Einfluss der während der Lade- und Entladevorgänge schwankenden Lufttemperatur im Hochdruckhohlraum auf die Temperaturverteilung im Abdichtungssystem untersucht.

Tabelle 1: Übersicht der Simulationsergebnisse für die in Abbildung 2 gezeigte Anlagenkonfiguration in Abhängigkeit des angenommenen Leckagemassenstroms unter der Annahme adiabater Speicherhöhlräume.

Leckagemassenstrom [kg/s]	Effizienz [-]	Relative Änderung in der Effizienz [-]	Erzeugte elektrische Energie [MWh]	Konsumierte elektrische Energie [MWh]	Entladedauer [h]	Ladedauer [h]
0	73.1	0.0%	499.1	682.9	5.00	5.00
1	71.4	-2.3%	493.1	690.6	4.94	5.06
2	69.8	-4.5%	487.3	698.5	4.88	5.12
10	58.0	-10.9%	444.6	766.9	4.44	5.64

### 2.1.2 Thermische Simulationen des Abdichtungssystems

Die Temperaturverteilung in den Schichten des Abdichtungssystems folgt aus der Lösung der Wärmeleitungsgleichung im zylindrischen Koordinatensystem,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1-2)$$

wo  $\rho$  die Dichte ( $kg/m^3$ ),  $c$  die spezifische Wärmekapazität ( $J/kgK$ ),  $T$  die Temperatur ( $K$ ),  $t$  die Zeit ( $s$ ),  $k$  die Wärmeleitfähigkeit ( $W/mK$ ) und  $r$  die radiale Koordinate bedeuten ( $m$ ). Am inneren Rand, d.h. bei  $r = D/2$ , wo  $D$  der Durchmesser des Hohlraums ist, gilt die Randbedingung

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=D/2} = -h(T_l - T|_{r=D/2}) \quad (1-3)$$

wo  $h$  der Wärmeübergangskoeffizient ( $W/m^2K$ ) und  $T_l$  die Temperatur der Luft ist. Der Radius des äusseren Randes des Rechengebietes wird gross genug gewählt, damit der Wärmefluss dort vernachlässigbar klein ist. Der Einfachheit halber werden die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit in jeder Schicht als konstant betrachtet. An den Berührungsflächen zwischen den Schichten des Abdichtungssystems gilt

$$k_1 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{12}^+} = k_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_{12}^-} \quad (1-4)$$

<sup>4</sup> Ob diese Verluste zu vertretbaren wirtschaftlichen Einbussen führen, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet werden. Die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit der in Abbildung 2 gezeigten Anlagenkonfiguration im Rahmen des SCCER Projekts haben sich verzögert und sich noch im Gang.



und die Bedingung, dass die Temperaturen identisch sind, d.h.  $T|_{r_{12}^+} = T|_{r_{12}^-}$ . Die Lufttemperatur  $T_l$  in Gleichung (1-3) folgt aus der Lösung der Gleichungen für die Erhaltung der Masse und Energie eines idealen Gases,

$$V \frac{d\rho_l}{dt} + \dot{m} = 0 \quad (1-5)$$

$$c_v V \frac{d\rho_l T_l}{dt} + \dot{m} c_p T_t = -h(T_l - T|_{r=D/2})A \quad (1-6)$$

wo  $V$  das Volumen des Hohlraums,  $\rho_l$  die Dichte der Luft,  $\dot{m}$  der Massenstrom ( $\dot{m} < 0$  während des Ladevorgangs,  $\dot{m} > 0$  während des Entladevorgangs),  $c_v$  und  $c_p$  die spezifischen Wärmekapazitäten der Luft bei konstantem Volumen/Druck,  $T_t$  die Totaltemperatur der ein-/ausströmenden Luft und  $A$  die Oberfläche des Hohlraums sind. (Die Herleitung der Gleichungen (1-5) und (1-6) und exakte Lösungen unter vereinfachenden Annahmen werden in [15] gezeigt.)

Gleichungen (1-2) bis (1-6) können auf einfache Art und Weise mit der Methode der finiten Volumen numerisch gelöst werden. Da die dünnen Materialschichten zu kleinen Zellgrößen führen, sind explizite Methoden für die Lösung von Gleichung (1-2) ineffizient. Aus diesem Grund werden Gleichungen (1-2) bis (1-4) mit zentralen Differenzen zweiter Ordnung im Raum und der impliziten Euler Methode in der Zeit gelöst. Gleichung (1-4) wird erfüllt, indem die Wärmeleitfähigkeit der Flüsse an den Berührungsflächen mit dem harmonischen Mittel berechnet wird, siehe [16]. Diese Methode führt zu einem tridiagonalen Gleichungssystem, das mit dem Thomas-Algorithmus effizient gelöst werden kann.<sup>5</sup>

### 2.1.3 Resultate

Im Folgenden werden Beispielresultate von Simulationen, die mit der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Methode durchgeführt wurden, gezeigt. Das Ziel der Simulationen ist zu bestimmen, wie warm die Luft in der Kaverne und somit auch die der Luft ausgesetzten Abdichtungsfolie wird. Die Beispielresultate wurden für das erste in Abschnitt 2.3.2.4 besprochene Abdichtungssystem erzielt. Die für die Simulationen benützten thermophysikalischen Eigenschaften der relevanten Materialien sind in Tabelle 2 gezeigt. Die Tabelle zeigt auch die Eigenschaften der 20 m dicken Felsschicht, die mitsimuliert wurde. Die Dicke der Felsschicht ist gross genug gewählt, um Randeffekte, die sich auf die Temperaturverteilungen im Abdichtungssystem auswirken, zu vermeiden. Der Durchmesser des simulierten Hochdruckhohlraums beträgt 30 m, was den in Abschnitt 2.4.1.1 beschriebenen Schachtdurchmesser und (etwa) Kavernendurchmesser entspricht. Die Anfangsbedingung für die Simulationen ist eine Temperatur von 20°C. Die drei Schichten des Abdichtungssystems werden mit 32, 140 und 500 Zellen und die Felsschicht wird mit 2000 Zellen aufgelöst. Zusammen mit einem Zeitschritt von 1 Sekunde wird sichergestellt, dass die numerischen Fehler vernachlässigbar sind.

Tabelle 2: Thermophysikalische Eigenschaften der Materialien, für die thermische Simulationen durchgeführt wurden. Die ersten drei Materialien entsprechen dem ersten in Abschnitt 2.3.2.4 besprochenen Abdichtungssystem.

Material	Dicke [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/kgK]	$k$ [W/mK]
SikaPlan WP 1100-32 HL	0.0032	1300	1400	0.16
Schutzschicht	0.0140	980	1000	0.17
Spritzbeton	0.05	2300	660	1.6
Fels (Granit)	20.0	2548	790	2.8

<sup>5</sup> Die in diesem Abschnitt beschriebene Lösungsmethode wurde so implementiert, dass sie einfach in das numerische Anlagenmodell von [14] integriert werden kann. Dieses Anlagenmodell wird unter [www.cas-si.org](http://www.cas-si.org) als Open-Source Code erhältlich sein.

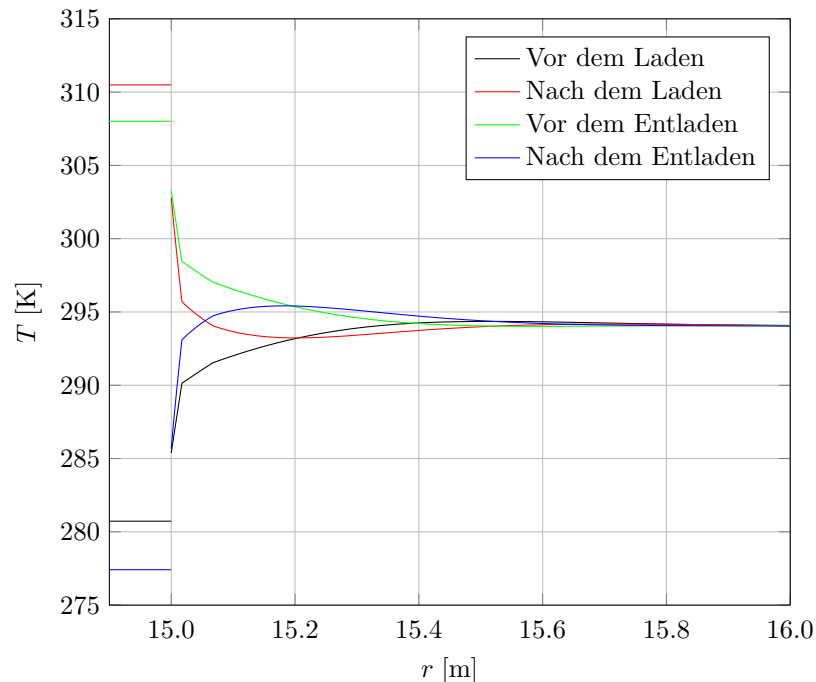


Abbildung 3: Beispielresultat der Simulation des Wärmeüberganges zwischen der Luft in der Kaverne, dem Abdichtungssystem und dem Fels für die Eigenschaften in Tabelle 3 unter quasi-stationären Bedingungen. Die Temperaturen im Abdichtungssystem und Fels werden an den Zellmittelpunkten gezeigt, was zum vermeintlichen Sprung der Temperatur am Kavernenrand führt.

Abbildung 3 zeigt die berechneten Temperaturverläufe im quasi-stationären Zustand in Abhängigkeit der radialen Koordinate. Mit «quasi-stationären Zustand» ist der Zustand gemeint, in welchem die Zustände im Hohlraum, im Abdichtungssystem und im Fels zu Beginn und zum Ende der Lade- und Entladephasen vom Zyklus unabhängig werden. Für  $r < 15$  m werden die räumlich nicht aufgelöste (und deshalb konstante) Lufttemperatur in der Kaverne gezeigt. Die Temperaturen werden für vier Zeitpunkte innerhalb eines Zyklus gezeigt:

- Vor der Ladephase, d.h. nach der Ruhephase vor der Ladephase,
- Nach der Ladephase, d.h. vor der Ruhephase nach der Ladephase,
- Vor der Entladephase, d.h. nach der Ruhephase nach der Ladephase,
- Nach der Entladephase, d.h. vor der Ruhephase vor der Ladephase.

In den Ruhephasen ändern sich die Temperaturen wegen dem Wärmeübergang zwischen Luft, Abdichtungssystem und Fels. Abbildung 3 zeigt, wie die Temperaturschwankungen in Abdichtungssystem und Fels den Schwankungen in der Kaverne «hinterherhinken», was durch die grössere thermische Trägheit der Feststoffe bedingt ist. Die Abbildung zeigt auch, dass die Temperaturverläufe im Abdichtungssystem unter quasi-stationären Bedingungen linear sind. Das zeigt, dass die Temperaturschwankungen in der Kaverne langsam genug sind, um den Wärmeübergang ebenfalls «quasi-stationär» werden zu lassen, wobei hier «quasi-stationär» bedeutet, dass die zeitlichen und räumlichen Ableitungen in Gleichung (1-2) individuell etwa gleich null sind. Die vielleicht wichtigste Erkenntnis der in Abbildung 3 gezeigten Resultate ist, dass die maximale Temperatur, der die Dichtungsfolie unter den berücksichtigten Bedingungen ausgesetzt ist, etwa bei 311 K, also etwa 38°C liegt. Inwiefern die Temperaturschwankungen von etwa 311 K - 277 K = 34°C ein Problem für die Dichtungsfolie sein könnten, muss abgeklärt werden.



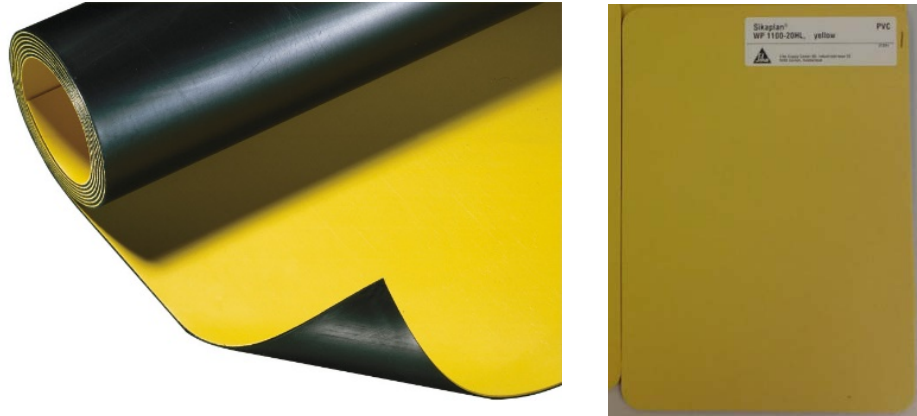


Abbildung 4: SikaPlan WP 1100-20HL, Rolle (links) und Muster (rechts) in der Nenndicke von 2mm.

## 2.2 Anforderungen an die Abdichtung und Untersuchungen von bestehenden Systemen

### 2.2.1 Auswahl Abdichtungssysteme

Die Abdichtung muss die dauerhafte erforderliche Luftdichtheit des Speicherhohlraums sicherstellen. Der wirtschaftlich akzeptable Gasverlust beim vorgegebenen Arbeitsdruck von 100 bar und einer maximalen Temperatur von 40 °C (aufgerundete Annahme aus den Resultaten im Abschnitt 2.1.3) soll den Wert von 1 kg/s nicht überschreiten (siehe Abschnitt 2.1.1). Um dies zu gewährleisten, muss der Untergrund und der Speicherhohlraum verschiedene Anforderungen erfüllen. Eine Aufweitung allfälliger Gesteinsrisse am Ausbruchsrand infolge der Druckbeaufschlagung des Hohlraumes kann durch die Vorspannung des Gebirges bei ausreichender Überlagerung ausgeschlossen werden (siehe Abschnitt 2.4.3.1). Die Welligkeit des Untergrunds soll keine biaxiale Dehnung von über 50% nach EN 14151 erzeugen. Entsprechend sind die Anforderungen an den Ausbruch und den Systemaufbau zu formulieren.

Für die Abdichtung des Speicherhohlraums wurden drei Feuchtigkeitsabdichtungen, welche aktuell im Ingenieurbau oder in Tunneln eingesetzt werden, ausgewählt:

- SikaPlan WP 1100-20HL, eine homogene Kunststoff-Dichtungsbahn auf Polyvinylchlorid mit Weichmacher (PVC-P) Basis nach EN 13491, siehe Abbildung 4.
- Sikalastic 8800, eine elastische, hochreaktive, lösemittelfreie, spritzbare Flüssigkunststoff-Abdichtung nach EN 1504-2, siehe Abbildung 5.
- Idrobit, eine kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung zur Bauwerksabdichtung in Anlehnung an EN 1504-2, siehe Abbildung 6.

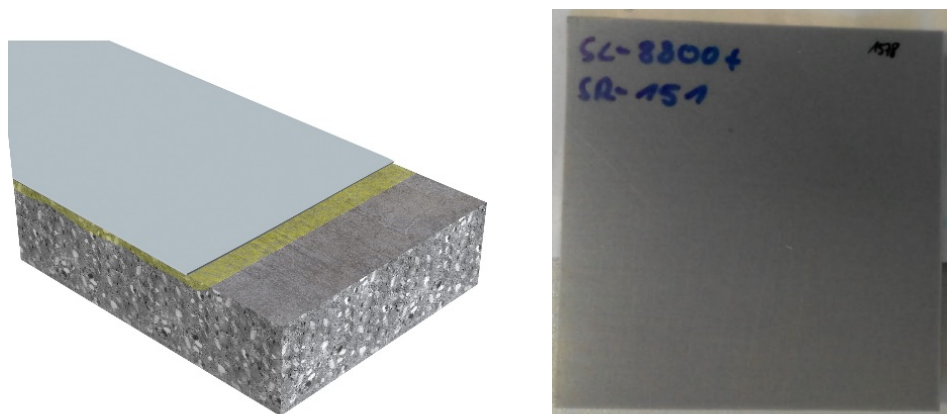


Abbildung 5: Sikalastic 8800, Schema des Abdichtungsaufbaus (links) und Muster (rechts).



Abbildung 6: Idrobit, Applikation (links) und Muster (rechts).

Im Gegensatz zu wasserundurchlässigem Beton, Tongestein etc. sind diese Abdichtungssysteme wasserdicht nach EN 1928 bzw. EN 14891. Der wesentliche Wasserverlust für Hohlräume, die mit diesen Systemen abgedichtet werden, ergibt sich durch die Wasserdampfdurchlässigkeit der Systeme. Diese wird durch die Diffusion von Wassermolekülen durch den Abdichtungswerkstoff erzeugt. Die Produkteigenschaften der drei Abdichtungssysteme sind aus den beigefügten Datenblättern ersichtlich, siehe Anhang 5.1. Diese Eigenschaften werden im Rahmen der CE Produktdatenerklärung attestiert und geprüft.

#### 2.2.2 Luftdichtheit/Luftdiffusion

Die Abdichtungssysteme sind nicht nur wasser- sondern auch luftdicht, allerdings diffundieren Gasmoleküle im Hochdruckspeicher je nach Druck- oder Konzentrationsgefälle durch die Systeme. Auf der Hochdruckseite gibt es aufgrund des höheren Druckes eine höhere Konzentration der Luftmoleküle. Diese adsorbieren auf der Abdichtungsoberfläche und die Moleküle wandern im gelösten Zustand durch die Abdichtungsschicht und desorbieren auf der Niederdruckseite, wo die Molekülkonzentration geringer ist.

Im manometrischen Prüfverfahren der Diffusion trennt die zu prüfende Folie zwei aneinandergrenzende Hohlräume vakuumdicht ab, siehe Abbildung 7. Die eine Seite wird mit dem Prüfgas beaufschlagt, die andere Seite wird evakuiert. Auf der Vakuumseite wird aus dem Druckanstieg das diffundierte Gasvolumen ermittelt. Diese Verfahren sind in ISO 15105-1 und DIN 53380-2 beschrieben [17].

Typische Eigenschaftswerte von polymeren Abdichtungswerkstoffen sind in der Literatur dokumentiert [18] [19]. Diese Eigenschaften hängen deutlich von der Temperatur und linear vom Konzentrationsge-

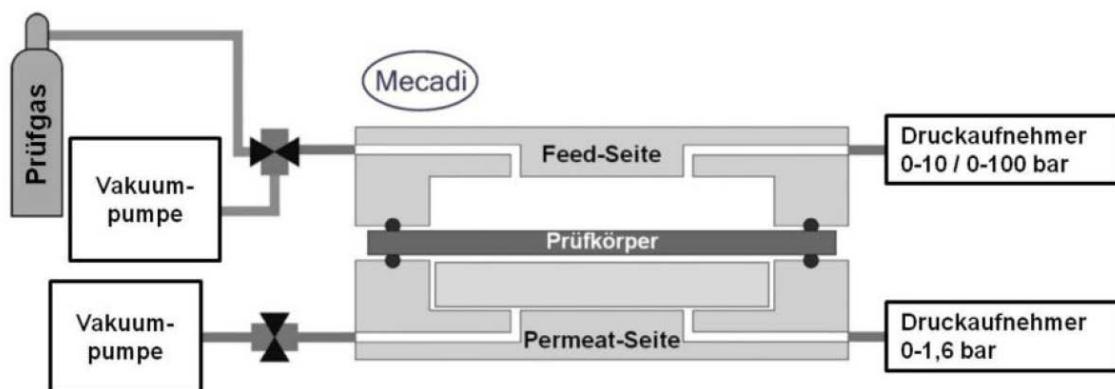


Abbildung 7: Schema der verwendeten Prüfapparatur [33].



fälle ab. Unterschiedliche Dicken führen zu einer Veränderung der Diffusionsleitfähigkeit (doppelte Dicke ergibt halbe Durchlässigkeit). Die Rezeptur der Abdichtung sowie weitere Medien beeinflussen die Diffusion auch [20].

### 2.2.3 Laborergebnisse bei 40°C und zwischen 0 und 10 bar Luft

Zunächst werden Labormuster/Bahnenmuster der Abdichtungssysteme bei 40 °C und einer Druckdifferenz von 10 bar mit einem manometrischen Verfahren gemessen. Zur Erhöhung der Präzision wurde der Blindwert (Undichtigkeit der Anlage mit einer Aluminiumabdichtung) der Prüfanlage bestimmt und die Probe zunächst entgast (Vorlagerung unter Vakuum von beiden Seiten). Somit können diese Störeinflüsse auf die Messung eliminiert werden.

Spezielle Bedingungen der Prüfdurchführung der Systeme:

- SikaPlan WP 1100-20HL: Das Bahnenmuster wird standardmässig vermessen.
- Sikalastic 8800: Das Muster wird auf das O-Ring Dichtungssystem der Prüfanlage aufgelegt. Aufgrund von oberflächiger Rissbildung der Muster bei der Prüfung werden EPDM-Masken (Dicke 1 mm) zur Vermeidung einer mechanischen Überbeanspruchung/dehnung des Musters im Bereich des O-Ring Dichtungssystem verwendet.
- Idrobit: Das Materialmuster wird aufgrund der ausgeprägten Kaltfluss-Eigenschaften zwischen zwei hochdurchlässigen Silikon-Folien (Dicke 1 mm) vermessen.

Bei den Versuchen wurde folgende Beobachtungen gemacht:

- SikaPlan WP 1100-20HL: Dieser Bahnentyp konnte standardmässig und stabil vermessen werden. Die industrielle Extrusion dieser Kunststoffbahnen mit den entsprechenden üblichen qualitätssichernden Massnahmen garantiert eine hochwertige homogene und konstante Materialqualität.
- Sikalastic 8800: Bei den untersuchten Mustern wurde eine oberflächliche Rissbildung auf der Vakuumseite beobachtet. Die oberflächlichen Risse und Lunker (kleine Lufteinschlüsse) verhinderten das Erreichen des angezielten Vakuums. Es strömte permanent von aussen Luft in die Vakuumseite der Apparatur. Die manometrische Vermessung konnte aus diesem Grund nicht durchgeführt werden. Die Verwendung einer geeigneten EPDM-Maske zur Verringerung der mechanischen Belastung führte nicht zum erwünschten Erfolg. Während dem Betrieb eines DLSKW würde bei Sikalastic 8800 Luft unter hohem Druck in die applikationsbedingten Lunker diffundieren. Bei Druckschwankungen oder Betriebsunterbrechungen würde die Luft in den Lunkern expandieren, was zum Aufplatzen der Abdichtung und zur Undichtigkeit des Abdichtungssystems führen könnte. Es zeigt sich, dass gespritzte Systeme wie Sikalastic 8800 infolge der anwendungsbedingten kleinen Lufteinschlüsse nicht als dauerhafte Luftabdichtung bei hohen Druckschwankungen geeignet sind.
- Idrobit: Nach dem Musterausbau war eine deutliche Ausstülpung der Prüfmusters schon bei 10 bar in Richtung der Hochdruckseite zu erkennen. Aufgrund der Kaltfluss-Eigenschaften des Materials kam es in Folge der Druckbeaufschlagung auf der Druckseite zu einem Materialfluss in Richtung des O-Ring Dichtungssystems der Prüfanlage. Die relevante Dicke veränderte sich somit während der Messung leicht und die Bahn wurde durchlässiger. Idrobit zeigt einen zu grossen kalten Fluss bei 40 °C für eine dauerhafte Abdichtung. Die Wärmeformbeständigkeit der Beschichtung ist nicht ausreichend. Das Material wird in einem DLSKW lokal zu stark fließen und undicht werden. Demzufolge werden bituminöse Abdichtungswerkstoffe wie Idrobit nicht weiterverfolgt.

Die für SikaPlan WP 1100-20HL und Idrobit gemessenen Permeationskoeffizienten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Aufgrund der Risiken, die sich in der Anwendung von gespritzten oder gestrichenen



Systemen aufgrund der beobachteten Phänomene ergibt, wurden die weiteren Hochdruckversuche bei 100 bar nur mit WP 1100-20HL durchgeführt.

Tabelle 3: Ergebnisse zur Luftdiffusion der drei Produkte bei Drücken bis 10 bar.

Produkt	Dicke [mm]	Permeationskoeffizient (bei 40°C, 0% relative Feuchtigkeit, 0-10 bar) [Ncm <sup>3</sup> mm m <sup>-2</sup> Tag <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]
SikaPlan WP 1100-20HL	1.9	230
Sikalastic 8800	2.1	Nicht messbar
Idrobit	2.1	250

#### 2.2.4 Laborergebnisse bei 40°C und bis zu 100 bar

Voruntersuchungen bei Raumtemperatur zeigten die prinzipielle Abdichtbarkeit des SikaPlan WP 1100-20HL Musters in der verwendeten Standard-Prüfanlage bei Drücken bis zu 100 bar. Unter diesen Bedingungen wurde kein Musterversagen (8-10 Std. über Nacht) beobachtet. Aufgrund der imperfekten Abdichtung der Laborapparatur (das verwendete O-Ring Dichtungssystem ist bei 40 °C und 100 bar nicht absolut dicht) und der hierdurch verfälschten Messergebnisse, wurden der Druck und die Temperatur stufenweise erhöht.

Nach der Druckbeaufschlagung mit 100 bar führt die Erhöhung der Prüftemperatur auf 40 °C zunächst zu einem Druckabfall auf der Hochdruckseite. Eine schrittweise Erhöhung des Drucks auf 100 bar führt zu einer Zerstörung des Prüfmusters aufgrund der Bohrung für den Vakuumanschluss, weil das Muster aufgrund der Druckdifferenz und der Erweichung des Thermoplast in die Bohrung fließt. Die Bahn wird dadurch unzulässig biaxial gedehnt und reißt. Um das Reißen des Prüfmusters zu verhindern, wurde die Prüfapparatur modifiziert: Das Prüfmuster wurde neu mit einer Sintermetallscheibe abgestützt und die EPDM-Abdichtung wurde optimiert. Dank dieser Modifikationen konnten aus dem Druckanstieg die in Tabelle 4 gezeigten Werte abgeschätzt werden.

Tabelle 4: Ergebnisse zur Luftdiffusion für SikaPlan WP 1100-20HL bei Drücken bis 100 bar.

Druck [bar]	Temperatur [°C]	Permeationskoeffizient (0% relative Feuchtigkeit) [Ncm <sup>3</sup> mm m <sup>-2</sup> Tag <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]
44	28	ca. 45
92	33	ca. 40

Die Präzision des Diffusionsprüfverfahrens begrenzt die Genauigkeit der Dichtheitsprüfung.

Der Vergleich mit den in Tabelle 3 aufgelisteten Werte zeigt, dass bei höheren Drücken niedrigere Druckanstiegsraten beobachtet wurden; die Bahnen werden mit steigendem Druck also dichter. Es ist unklar, ob dieser Effekt durch die Kompression der Bahnen oder Abdichten der Sintermetallporen (Veränderung der effektiven Fläche für die Desorption) zustande kommt. Der Permeationskoeffizient oder der Diffusionsleitwert ist normalerweise unabhängig vom Druckgefälle und Dicke. Er ist aber deutlich von der Temperatur abhängig. Daher wird für die weiteren Untersuchungen die Diffusion bei 40 °C für 0-10 bar Druckdifferenz gemessen. Die Luftdurchlässigkeit für höhere Druckgefälle bis zu 100 bar wird nach ISO15105-1 rechnerisch extrapoliert (10-fach höhere Luftdurchlässigkeit bei einer Druckdifferenz von 100 bar als bei 10 bar).



### 2.2.5 Grenzwertbestimmung Dichtheit

Für die Anwendung im Druckluftspeicher sollte der Luftspeicherverlust unter 1 kg/s liegen, dann kann der Energieverlust als akzeptabel betrachtet werden (siehe Abschnitt 2.1.1). Um Verluste unter diesem Wert zu gewährleisten, muss die Diffusion nicht präzise ermittelt werden, sondern sie muss nur unterhalb eines Grenzwerts liegen.

Der Druckverlust, der sich für eine mit WP 1100-20HL abgedichteten Kaverne ergibt, liegt deutlich unter den Vorgaben, siehe Tabelle 5. Aufgrund dieser einfachen Abschätzung kann das Abdichtungssystem WP 1100-20HL als ausreichend dicht betrachtet werden. Allerdings muss diese Aussage insofern relativiert werden, dass das Dichtungssystem in einem DLSKW dauerhaft den mechanischen Belastungen durch Schwankungen des Luftdrucks, Bewegungen des Untergrunds oder einer Erweichung durch lokale Temperaturbelastungen ausgesetzt ist. Zusätzliche Risiken ergeben sich aufgrund der Alterung und der angrenzenden Medien.

Tabelle 5: Umrechnung der Messergebnisse für WP1100 20HL vom Permeationskoeffizienten in den äquivalenten Leckagemassenstrom.

Vorgaben für Druckspeicher Kaverne		
max. Gasverlust	kg/s	1
Freies Volumen in der Kaverne	m <sup>3</sup>	177'000
Oberfläche Kaverne	m <sup>2</sup>	26'000
Messergebnisse WP1100 20HL		
Permeationskoeffizient bei 40°C	cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	0.0115
Umgerechneter Gasverlust	kg/s	0.0027
1 mol Luft: 28.95 g und 22'300 cm <sup>3</sup> ; 1 d = 86'400 s		

Für viele Systemaufbauten inklusive Untergrund ist die Prüfkammer nicht ausreichend gross. Hier kann nicht immer der komplexe Diffusionstest durchgeführt werden. Daher ist in diesem Projekt ein günstiger Dichtigkeitstest mit ausreichender Genauigkeit entwickelt worden. Mit diesem Test kann auch die Dichtigkeit nach Vorbelastung im Systemaufbau geprüft werden.

### 2.2.6 Ergänzende Untersuchungen bei 40°C und 10 bar

Systemprüfungen von WP 1100-20HL mit Schutzmatte auf rauem Untergrund haben gezeigt, dass bei 100 bar und 40 °C die Gefahr der mechanischen Beschädigung besteht (siehe Abschnitt 2.3.2). Um das Risiko der mechanischen Beschädigung zu vermindern, wurden zusätzlich zwei Abdichtungsbahnen geprüft, die auf glatten Beton geklebt werden können: Sikadur-Combiflex SG System und SikaPlan WT Tape-200. Diese Produktdatenblätter sind in Abschnitt 5.1 beigefügt. Beide Abdichtungssysteme basieren auf TPO (thermoplastische Polyolefine) Bahnen und können vollflächig mit Epoxidharzsystem auf glatten Beton verklebt werden. Diese Bahnen wie deren Verklebung zum Untergrund sind wasserdicht.

Die beiden Bahnen wurden, wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, bei 40° C und zwischen 0-10 bar geprüft. Beide Bahnen konnten wie die WP 1100-20HL Bahn standardmässig vermessen werden. Wie aus Tabelle 6 ersichtlich, sind die Diffusionsverluste der beiden Bahnen ähnlich wie die Verluste der WP 1100-20HL Bahn.



Tabelle 6: Ergebnisse zur Luftdiffusion der beiden Schutzmaten bei Drücken bis 10 bar im Vergleich zu SikaPlan WP 1100-20HL.

Produkt	Dicke [mm]	Permeationskoeffizient (bei 40°C, 0% relative Feuchtigkeit, 0-10 bar) [Ncm <sup>3</sup> mm m <sup>-2</sup> Tag <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]
SikaPlan WP 1100-20HL	1.9	230
Sikadur Combiflex SG System	2.0	250
SikaPlan WT Tape-200	2.2	200

Durch die Verklebung wird eine zusätzliche Dichtschicht aufgebracht. Daher ist es auch mit diesen Systemen möglich, eine luftdichte Abdichtung zu installieren. Die Systemaufbauten sind in Abschnitt 2.3 beschrieben. Alle gängigen hochwertigen Kunststoffabdichtungsbahnen ab einer Nenndicke von 2 mm haben vermutlich eine ausreichende Luftdichtheit.

## 2.3 Anbringen von Abdichtungen in Speicherhöhlräumen

Es wurde untersucht, wie die Abdichtung im Hohlraum angebracht werden kann, wie Leckagen geortet und repariert werden können, welche Unterhalt- und Inspektionsintervalle anfallen und welche Kosten mit der Abdichtung verbunden sind.

### 2.3.1 Potentielle Systeme

Es wurden verschiedene Systeme angedacht und untersucht. Grundsätzlich sollen existierende Abdichtungssysteme auf ihre Tauglichkeit für die Anwendung in ein Druckluftenergiespeicher geprüft werden. Diese Abdichtungssysteme sind für die Bauwerksabdichtung gegen Wassereindringung entwickelt worden. Sie werden im Tunnelbau, im Tiefbau und im Hochbau weltweit seit über 50 Jahren angewendet. Im Tunnelbau wird üblicherweise mit Wasserdrücken bis circa 150 Meter (15 bar) geplant, da die resultierenden Drücke sonst massive Beton-Innenschalen verlangen. Tunnelabdichtungen aus weichgemachtem Polyvinylchlorid (PVC-P) oder flexiblen thermoplastischen Polyolefinen (TPO) können jedoch Wasserdrücke von über 200 Metern problemlos widerstehen.

Eine der Aufgaben dieses Forschungsprojekts ist die Untersuchung von Abdichtungssystemen, die bei Drücken von bis zu 100 bar genügend luftdicht sind um die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht zu gefährden. Neben den klassischen Kunststoff-Abdichtungsmembranen wurden auch gespritzte Systeme aus Polyurea (Sikalastic 8800) und Bitumen (Idrobit) in Betracht gezogen. Diese gespritzten Systeme weisen einen erheblichen Vorteil bei der Applikation auf, da sie einfach auf die Spritzbetonschicht aufgespritzt werden können. Abdichtungsfolien hingegen werden in der Regel mit Punktschweissungen auf vorgängig befestigten Discs am Untergrund fixiert. Diese Kunststoffbahnen werden industriell hergestellt und haben deswegen eine sehr hohe Konstanz und Produktionsqualität.

Wie in Abschnitt 2.2.3 erwähnt, wiesen die gespritzten Folien (Sikalastic 8800 und Idrobit) kein befriedigendes Resultat bei hohen Drücken und Betriebstemperaturen nach. Insbesondere wurde die Bildung von Bläschen, welche durch den Spritzvorgang der Applikation entstehen, als problematisch eingestuft. Beim Druckablass in der Kaverne können die Bläschen, welche diffusionsbedingt hohe Luftdrücke aufweisen, platzen. Deswegen wurde einzig die Kunststoffabdichtungsbahn SikaPlan WP 1100-20HL für die weiteren Betrachtungen berücksichtigt.





Die Risse im Spritzbeton, welche sich entsprechend den Druckschwankungen öffnen und schliessen würden, haben maximal eine Summe von 6 cm (siehe Abschnitt 2.4.3.2). Die ermittelten 6 cm Gesamtrissbreite verteilt sich entlang des Umfangs von ca. 95 m (für einen Hohlraumdurchmesser von 30 m). Dies ergibt einen Schnitt von 0.6 mm Riss pro Laufmeter Umfang. Diese Risse entsprechen weniger als 1/3 der Membranstärke und sollten problemlos mit dem Abdichtungssystem überbrückt werden können. Die Dehnung einer losen Abdichtungsbahn über den Riss ist unproblematisch, können doch solche Kunststoffbahnen Dehnungen von über 300% überbrücken. Das Risiko bei Rissen besteht eher in der Möglichkeit, dass die durch die Temperatur erweichte Abdichtungsbahn durch den hohen Innendruck in den Riss hineingepresst wird. Das effektive Verhalten im Rissbereich konnte jedoch nicht mit den zur Verfügung stehenden Prüfanlagen definitiv getestet werden und sollte womöglich in einem zukünftigen Projekt untersucht werden. Auf jeden Fall muss die Rissverteilung mittels einer entsprechenden Bewehrung der Spritzbeton Trägerschicht kontrolliert werden.

### 2.3.2 Installation der Abdichtung

Die Anbringung der Abdichtungslösung erfolgt für alle Varianten manuell. Bezüglich der nötigen Vorrichtung für die Installation der Abdichtungslösung (Arbeitsbühne), wurden permanente oder temporäre, sowie fixe oder bewegliche Ansätze untersucht. Vergleiche mit anderen Untertagebauprojekten und Industriekenntnisse deuten darauf hin, dass eine bewegliche Vorrichtung (permanent oder abmontierbar) die technisch und wirtschaftlich günstigste Lösung darstellt.

Für den HDHR der Variante Schacht (siehe Abbildung 17) erfolgt die Installation mittels einer vertikalbeweglichen, seilgeführten Plattform durch den Zugang oben am Schacht. Diese Plattform kann entweder permanent in der Druckzone bleiben, um nach dem Bau der Anlage für Inspektionen und Reparaturen eingesetzt zu werden, oder abmontiert und bei Bedarf wieder montiert werden. Solche Plattformen bestehen in der Regel aus einem Metallgerüst (zum Beispiel aus Baugerüst-Elementen) und einem Holzbelag. Sie sind dementsprechend leicht zerlegbar und flexibel. Für den HDHR der Varianten Kaverne sowie Kaverne/Tunnel (siehe Abbildung 17) erfolgt die Installation mit einer Hebebühne mit ausfahrbarer Plattform, die durch die Stahltür im Zapfen passen muss. Die Installation der Abdichtung im NDHR für alle Hohlraumvarianten (Siehe Abbildung 19 und Abbildung 20) erfolgt identisch mit einer Hebebühne mit ausfahrbarer Plattform.

#### 2.3.2.1 Befestigung der Abdichtung

In der Regel wird eine Abdichtungsbahn wie folgt eingebaut:

1. In einem ersten Schritt werden verträgliche Kunststoff-Discs auf der Trägerschicht mittels geschossenen Befestigungsnägel fixiert. Diese Discs werden auch zur Befestigung der Schutzschicht eingesetzt.

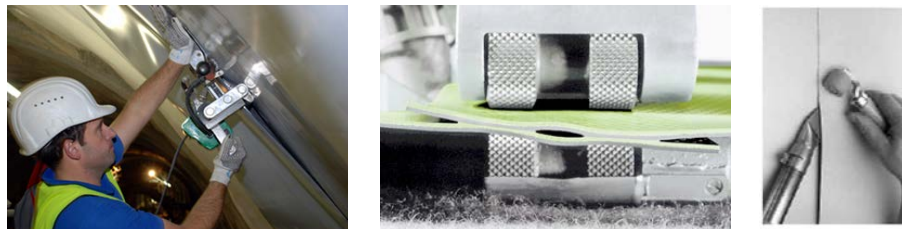




2. Anschliessend wird die Abdichtungsbahn durch Punktschweissung an die Discs befestigt:



3. Danach werden die 2 Meter breiten Abdichtungsbahnen miteinander verschweisst:



4. Die Schweissnähte werden anschliessend auf ihre Dichtheit geprüft:



Bei dieser Applikation besteht jedoch das Problem, dass keine Nägel zur Befestigung eingesetzt werden dürfen. Es ist zu befürchten, dass infolge der auf die Abdichtung wirkenden hohen Drücke die Befestigungsnägel sich durch die Membrane drücken und damit diese beschädigen könnten. Deswegen wurden Alternativen untersucht. Grundsätzlich soll die Befestigung mittels Spezialklebstoff (Epoxy-basiert) an der Trägerschicht befestigt werden.

#### 2.3.2.2. Schichtaufbau

Die Kunststoffabdichtungsbahn wird mit dem vollen Betriebsdruck an den Untergrund gepresst. Durch erhöhte Betriebstemperaturen könnte das Material zusätzlich aufgeweicht werden. Es gilt die Abdichtung vor jeglichen Beschädigungen durch Unebenheiten der Trägerschicht zu schützen. Auf der Innenseite des Hohlraums drückt Luft gegen die Membrane. Dies verursacht eine gleichmässige hohe Druckverteilung. Die Membrane wird dabei in die Trägerschicht gepresst. Unebenheiten wie hervorragende Gesteinskörnungen können die Membrane verletzen. Als Faustregel gilt, dass die Rauigkeit die Hälfte der Membrandicke nicht überschreiten soll. Das heisst, dass sich Unebenheiten nicht tiefer als die halbe Dicke in die Membran einpressen.

Im Weiteren muss beachtet werden, dass keine punktuell hohen Druckspitzen aus Installationen auf die Membrane-Innenseite einwirken, insbesondere bei erhöhten Betriebstemperaturen.





Abbildung 8: Apparatur für Druckprüfung nach SIA 280:1996.



Abbildung 9: Normdruckkörper nach SIA 280:1996 (50 mm x 50 mm; 3 mm gebrochene Quarzkörner).

Es gilt hier einen hohen Schutz der Bahn sicherzustellen. Vorab soll eine möglichst ebene Fläche durch eine Spritzbeton-Trägerschicht erreicht werden. In der Regel wird eine Ebenheit von 1:10 verlangt. Dies entspricht zum Beispiel auf 1 m Länge einer Vertiefung von weniger als 10 cm. Weiter sollte die Spritzbetonoberfläche möglichst glatt sein. Bei Schwimmbädern, wo der Wasserdruck die Membrane gegen den Unterlagebeton drückt, werden spiegelglatte Oberflächen der Tragschicht verlangt. Eine spiegelglatte Oberfläche ist jedoch im Untertagbau nicht vernünftig realisierbar. Zusätzlich herrschen in unserem Fall höhere Drücke auf die Folie. Deswegen wurde eine Lösung mit einer massiven Schutzschicht aus Kunststoff gewählt. Diese soll die Abdichtungsbahn vor der Rauigkeit der Spritzbetonoberfläche schützen.

In Rahmen der SIA 280:1996 wird für Abdichtungen gegen drückendes Wasser z.B. im Tunnel die Dauerdruckfestigkeit Prüfung Nr. 14 spezifiziert, siehe Abbildung 8. Hierbei wird das Perforationsverhalten der Abdichtung unter der dauernden Belastung auf einer definierten Rauigkeit geprüft. Dieses Verfahren wurde an die Anwendung in der Hochdruckkaverne angepasst. Auf das Abdichtungssystem inkl. Untergrund, siehe Abbildung 9, mit vorgegebener Rauigkeit wird mittels eines Stempels mechanisch der Druck von 100 bar bei 40°C für mindestens 48 h aufgebracht. Hierzu werden die anwendungsrelevante Gesteinskörnung in ein Epoxykleberbett zur Hälfte eingebettet. Danach wird die verformte Probe optisch auf Undichtigkeiten/Löcher überprüft und die Luftdichtigkeit bei 100 bar und 40°C geprüft.

Die Abdichtungsbahn wurde in dem angepassten Dauerdruckversuch beansprucht, in welchem die 100 bar Luftdruck durch ein 5 cm Stempel mit dem entsprechenden Anpressdruck bei 40°C simuliert wurden. Abbildung 10 stellt den Schichtaufbau schematisch dar. Erste Tests wurden mit einer Schutzbahn für

**Schichtaufbau Prüfkörper 100 mm x 100 mm**  
(Stempel 50 mm x 50 mm)

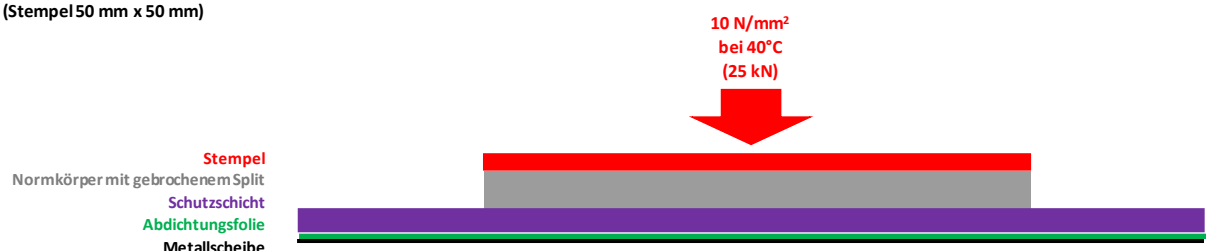


Abbildung 10: Schichtaufbau für die Druckversuche gemäss SIA 280:1996.



Abbildung 11: Zustand der Abdichtungsbahn und der Schutzschicht nach dem Druckversuch bei 40°C und 100 bar auf eine 0-8mm Körnung.

Sportzentren (zum Schutz vor fallenden Hanteln) durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese 1.4 cm dicken Hartgummimatten bei groben Spritzbetonoberflächen, mit einem 0-8 mm Korn, bei den hohen Betriebstemperaturen nicht ausreichend sind. Dabei wurde die Abdichtungsbahn mehrfach durch Steinkörnungen durchbohrt. Weiter wurden Kieselsteine aus dem Epoxykleberbett gebrochen, was bei Spritzbeton auch zu erwarten ist. Abbildung 11 zeigt die Resultate des ersten Tests. Es zeigt sich, dass eine geringere Rauigkeit des Spritzbetons gefordert werden muss. Bei einer Rauigkeit entsprechend einem 0-4 mm Spritzbeton wurde die Abdichtungsbahn nicht beschädigt, wie Abbildung 12 zeigt.

Basierend auf diesen Erfahrungen und Überlegungen wurden verschiedene mögliche Schichtaufbauten weiterverfolgt:

- SikaPlan WP 1100-30 (3 mm) mit 1.4 cm Gummi-Schutzmatte (Basisvariante).
- SikaPlan WP 1100-30 (3 mm) mit 4 mm Schutzmembrane mittels Sika WP Tape und Epoxykleber an den Untergrund befestigt.
- Sika Combiflex 2 mm mittels Epoxykleber am Untergrund befestigt.

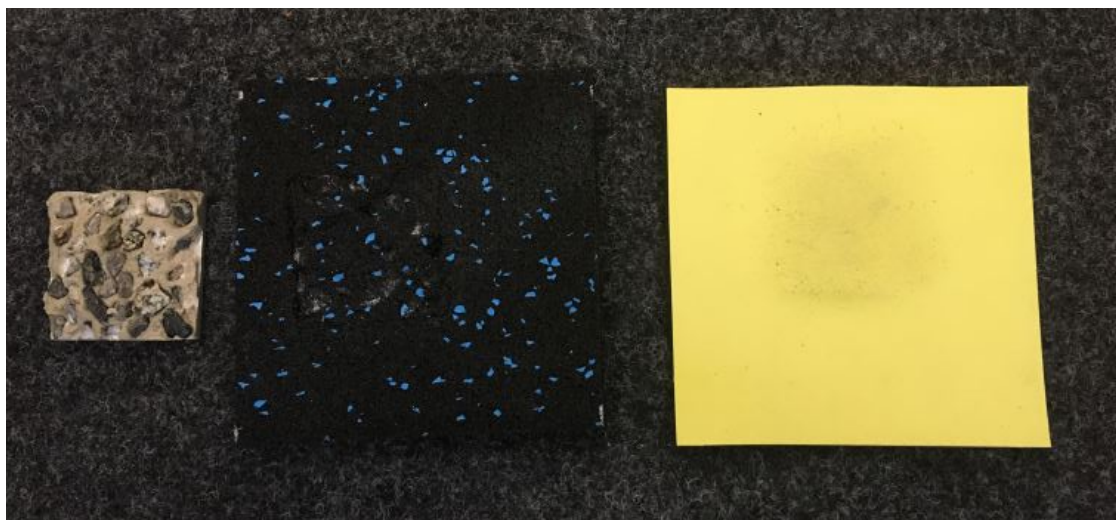


Abbildung 12: Zustand der Abdichtungsbahn und der Schutzschicht nach dem Druckversuch bei 40°C und 100 bar auf eine 0-4mm Körnung.



Die Anforderungen an die Rauigkeit der Trägerschicht und an die Befestigungsmethode unterscheiden sich bei den drei Varianten. Bei den ersten beiden Varianten mit SikaPlan WP 1100-30 wurde zur Erhöhung der Sicherheit eine 3 mm Bahn gewählt im Gegensatz zur 2 mm Bahn, die in den Diffusionstests in Abschnitt 2.2 geprüft wurde.

### 2.3.2.3. Elemente des Schichtaufbaus

Die Hauptelemente des Schichtaufbaus sind:

- Fels: Der Einsatz einer profilgenauen schonenden Sprengmethode wird benötigt, um Unebenheiten zu vermeiden und die Felsmatrix durch den Sprengvorgang möglichst nicht zu zerstören.
- Trägerschicht: Diese Spritzbetonschicht soll die gewünschte Ebenheit von 1:10 garantieren, die geforderte Rauigkeit erreichen und die Rissweite / Rissverteilung gewährleisten.
- Schutzschicht: Die Schutzschicht dient einzig dem Schutz der Abdichtungsfolie.
- Abdichtung: Dies ist das eigentliche Element, welches die geforderte Dichtheit garantiert.

Im Bodenbereich wird die Abdichtungsbahn durch eine aufliegende Betonschicht geschützt. Auf der Abdichtungsfolie wird eine Schutzschicht verlegt (Schutzmatte oder Schutzfolie). Auf der Schutzschicht wird die bewehrte Bodenplatte betoniert. Auf der Bodenplatte können die Installationen (Wärmespeicher) befestigt werden. Falls nötig müssen Horizontalkräfte (die durch Erdbeben entstehen könnten) z.B. mittels einer Verzahnung aufgenommen werden.

Im Eingangsbereich wird der Kavernenzugang mittels einem massiven Betonzapfen, inklusive Zugangseinrichtung, verschlossen. Die Anbringung der Abdichtung an den Zapfen ist einer der kritischsten Aufgaben, da dort die Kontinuität der Abdichtung unterbrochen und vom Zapfen übernommen werden muss. Deshalb ist es unerlässlich, dass die Zapfenoberfläche eine mindestens genau so gute Abdichtung darstellt wie der Rest der Kaverne. Um das zu gewährleisten, ist vorgesehen, dass die Zapfenoberfläche mit einer Stahlfassade versehen wird, die an den Rahmen der Stahltür verschweisst wird. Die Abdichtungsbahn wird wiederum so an die Stahlfassade angebracht, dass letztendlich die gesamte

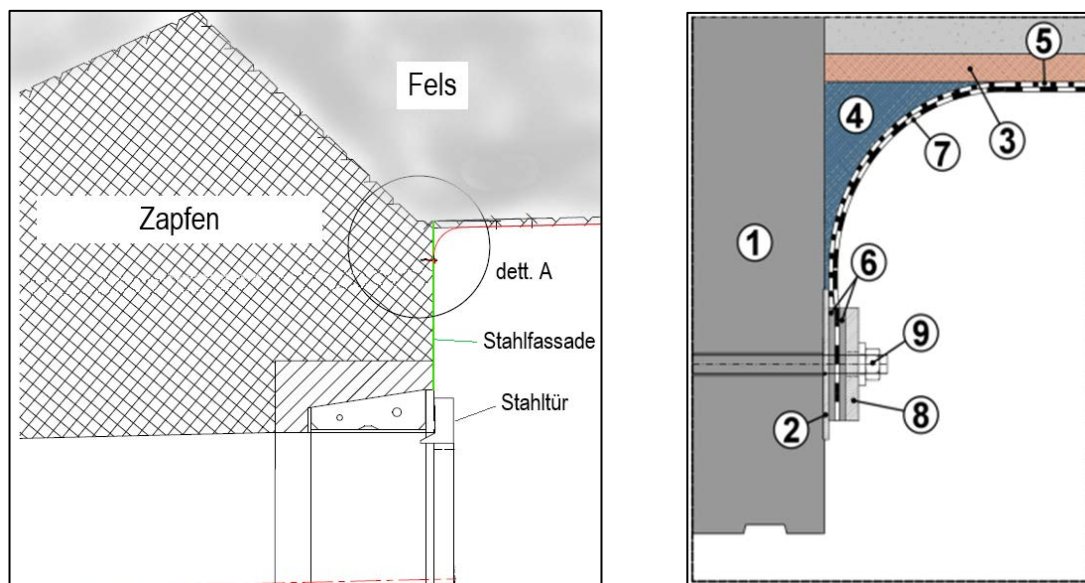


Abbildung 13: Anbringung der Abdichtung an den Zapfen: 1. Stahlfassade auf dem Betonzapfen, 2. Ausgleichsschicht (falls erforderlich), 3. Trägerschicht, 4. Mörtel-Ausrundung, 5. Schutzschicht, 6. Dichtschicht (evtl. Epoxyleber), 7. Abdichtungsbahn, 8. Klemmleiste, 9. Klemmschraube. Quelle: ALACAES/Sika.

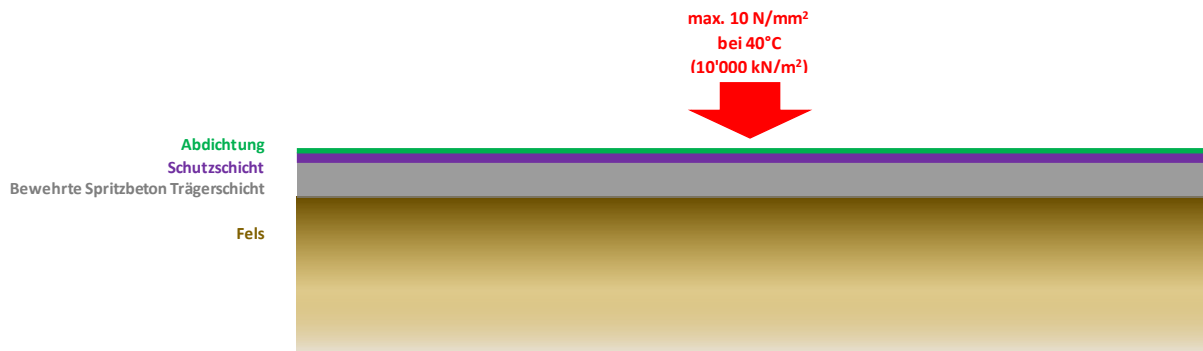


Kavernenoberfläche abgedichtet ist, und kein nackter Beton oder Fels mehr vorliegt. Die Abdichtungsbahn wird mit einem Epoxidharzkleber an die Stahlfassade verklebt und mittels einer Klemmleiste in die Stahlfassade verschraubt, siehe Abbildung 13.

#### 2.3.2.4. Schichtaufbau der drei vorgeschlagenen Systeme

SikaPlan WP 1100-30 (3 mm) mit 1.4 cm Gummi-Schutzmatte: Als Basisvariante wurde an eine Abdichtungsbahn mit einer 1.4 cm dicken Gummimatte als Schutzschicht gedacht. Diese soll die Benutzung eines feinkörnigen Spritzbetons ohne zusätzliche Oberflächenbehandlung erlauben. Die Befestigung der massiven Schutzschicht wird jedoch insbesondere im Firstbereich komplex, da keine Befestigungsnägel eingesetzt werden dürfen, um beim Zusammendrücken der Schutzschicht eine Verletzung der Abdichtung zu verhindern.

Der Aufbau würde wie folgt aussehen:

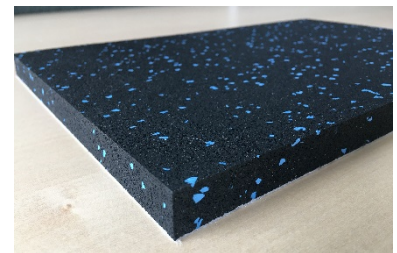


Trägerschicht:

Hohlraumsicherung gemäss Anforderung der Felsmechanik / Statik. Abdeckung von eventuellen Ankerköpfen mit Spritzbeton. Ausgleichen von Unebenheiten. Ca. 5 cm feinkörniger Spritzbeton 0-4 mm im Trocken- oder Nassverfahren. Schonender Auftrag um eine möglichst geringe Rauigkeit zu erreichen. Festigkeit > C35/45. Die Trägerschicht muss voraussichtlich mit einer Kunststoffaserbewehrung verstärkt werden.

Schutzschicht:

1.4 cm Gummi-Schutzmatte (z.B. Typ Formtech «Pure Black») oder ähnliches, siehe Abbildung rechts. Schutzmatte mit Klebeband an Trägerschicht befestigt (es dürfen keine Nägel oder ähnliches im Bereich der Abdichtung benützt werden um das Durchstanzen der Membrane zu verhindern).



Abdichtung:

3 mm PVC SikaPlan WP 1100-30HL Abdichtungsbahn mit Klebstoff oder Velcro an Schutzschicht befestigt. Verschweisste Verbindungsnahten. Maximal 3-lagige Stösse (T-Stoss).

Eine Kompatibilitätsprüfung hat ergeben, dass die im Versuch eingesetzte Gummi-Schutzmatte nicht mit der eingesetzten PVC Abdichtungsbahn verträglich ist. Die Prüfung zeigt eine dauerhaft zu hohe



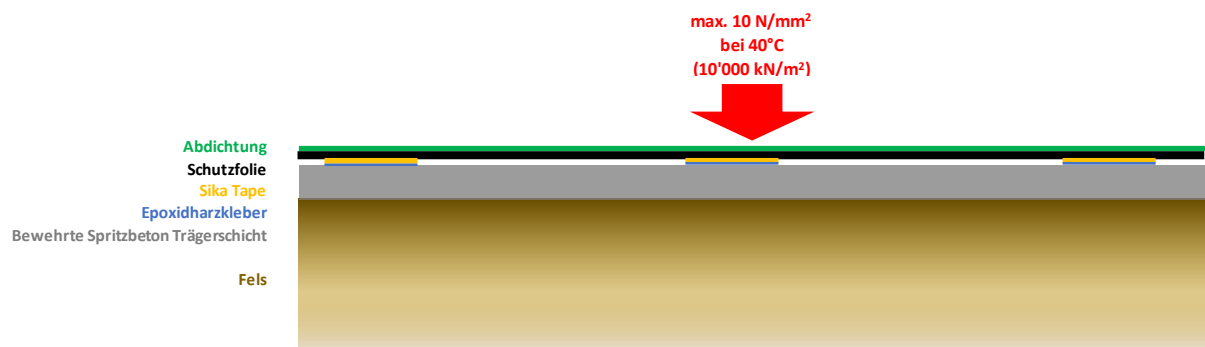


Abbildung 14: Abtalschieren des frischen Spritzbeton.

Gewichtsänderung der Abdichtungsbahn bei Kontakt mit der Schutzbahn. Die Sika-internen Anforderungen für die Verträglichkeit der Produkte werden nicht erfüllt. Entweder muss eine verträgliche Schutzschicht mit ausreichender Schutzwirkung im Markt gefunden werden, oder beide Bahnen müssen durch eine druckfeste Trennschicht (z.B. ein Geotextil) dauerhaft getrennt werden. Der Einbau muss auch in einem zukünftigen Forschungsauftrag näher untersucht werden. Die Schutzbahn ist wenig flexibel und schwer. Ein Einbau der Schutzmatte über Kopf mittels Klebstoffes oder Velcro müsste im Grossversuch genauer analysiert werden.

SikaPlan WP 1100-30 (3 mm) mit 4 mm Schutzmembrane: Basierend auf den oben erwähnten Tatsachen wurden Alternativlösungen untersucht. Eine Lösung sieht eine dünnere Schutzbahn von 4 mm Dicke jedoch aus härterem PVC Material ähnlich der Abdichtungsfolie vor. Die zwei Folien sind kompatibel und können miteinander verschweisst werden. Jedoch verlangt die dünnere Schutzschicht eine glattere Spritzbetonoberfläche. Dies soll mit einem Abtalschieren des frischen Spritzbetons erreicht werden, siehe Abbildung 14.

Dabei würde der Aufbau wie folgt aussehen:



Trägerschicht:

Hohlraumsicherung gemäss Anforderung der Felsmechanik / Statik. Abdeckung von eventuellen Ankerköpfe mit Spritzbeton. Ausgleichen von Unebenheiten. Ca. 5 cm feinkörniger Spritzbeton 0-4 mm im Trocken- oder Nassverfahren. Abtalschierte Oberfläche um eine maximale Glätte zu erreichen. Festigkeit > C35/45. Die Trägerschicht muss voraussichtlich mit einer Kunststoffaserbewehrung verstärkt werden.



Befestigungstreifen: 10 cm breite SikaPlan WP Tape 200 Streifen auf Spritzbetonuntergrund mit Sikadur Epoxykleber befestigen (Geschätzte Menge: 1.5 m/m<sup>2</sup>).

Schutzschicht: Vollflächige 4 mm starke PVC Schutzschicht mit SikaPlan WP Protection Sheet-40HE auf die SikaPlan WP Tape 200 Streifen verschweisst.



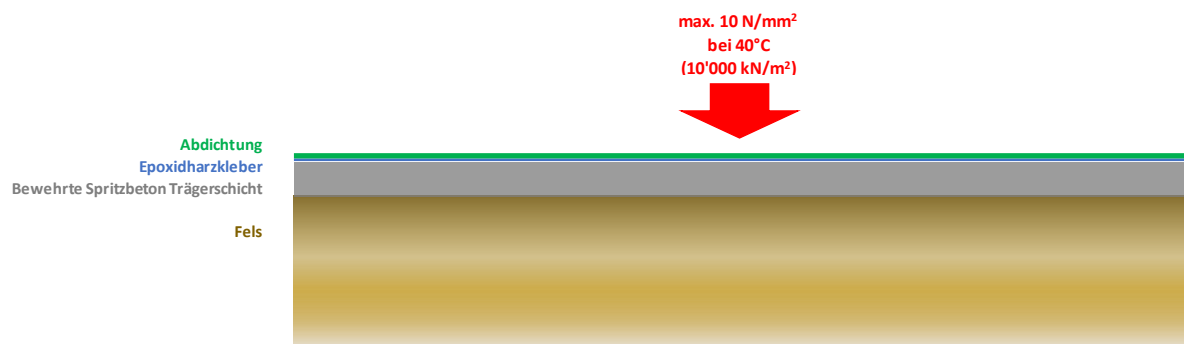
Abdichtung: 3 mm PVC SikaPlan WP 1100-30HL Abdichtungsbahn punktuell an Schutzschicht verschweisst. Verschweisste Verbindungsnahte. Maximal 3-lagige Stösse (T-Stoss).

Dieser Aufbau basiert auf bewährten Materialien die kompatibel sind. Die Sika WP Tape Streifen werden vollflächig direkt auf der Betonoberfläche verklebt und halten einen Zug von mehr als 2 N/mm<sup>2</sup> aus. Die Schutzbahn wird dann direkt auf das Tape punktuell geschweisst und die Abdichtungsfolie an die Schutzfolie. Die Abdichtungsfolie ist wie beim ersten Aufbau punktuell befestigt und hängt, wenn die Kaverne nicht unter Druck steht, zwischen den Befestigungspunkten durch.

In einem zukünftigen Projekt muss untersucht werden, wie sich die Abdichtungsbahn im Bereich der Unebenheiten, welche durch die SikaPlan WP Tape 200 Streifen entstehen, verhält. Weiter muss mit Falten in der Abdichtungsbahn gerechnet werden. Das Verhalten dieser Falten bei hohen Drücken muss näher analysiert werden.

Sika Combiflex 2mm: Eine weitere Lösung besteht aus einer vollflächig mit dem Untergrund verklebten Abdichtung. Die Abdichtungsbahn besteht aus einer 2 mm dicke TPO Membrane (Combiflex). Als Alternative könnte auch eine Membrane auf Basis des Tricoflex-Dichtstreifens oder eine Membrane basierend auf den SikaPlan WT Tape-200 in Frage kommen. All diese Folien sind so behandelt, dass sie direkt vollflächig mit dem abtalschierten Spritzbeton verklebt werden können. Anschliessend werden die Bahnstreifen in den Nähten miteinander verschweisst.

Dieser Aufbau würde wie folgt aussehen:



Trägerschicht: Hohlraumsicherung gemäss Anforderung der Felsmechanik / Statik. Abdeckung von eventuellen Ankerköpfen mit Spritzbeton. Ausgleichen von Unebenheiten. Ca. 5 cm feinkörniger Spritzbeton 0-4 mm im Trocken- oder Nassverfahren. Abtalschierte Oberfläche um eine kleinstmögliche Rauigkeit zu



erreichen. Festigkeit > C35/45. Die Trägerschicht muss voraussichtlich mit einer Kunststoffaserbewehrung verstärkt werden.

**Befestigungsschicht:** Ca. 7 kg/m<sup>2</sup> Epoxidharzkleber (Typ SikaDur-Combiflex CF Kleber) vollflächig aufgetragen zur Befestigung der Combiflex Bahnen.

**Abdichtung:** 2 mm TPO Abdichtungsbahn (Typ Sika Combiflex 2mm) vollflächig an Trägerschicht verklebt. Verschweisste Verbindungsnahte. Maximal 3-lagige Stösse (T-Stoss).

Bei dieser Lösung werden die Unebenheiten der Trägerschicht mittels Epoxidharzkleber ausgeglichen und die Abdichtungsbahn vollflächig mit dem Untergrund verklebt. Dies ist eine erprobte Lösung für ein Wasserabdichtungssystem. Das Verhalten des Systems müsste jedoch in einem kommenden Schritt unter den hohen Betriebsdrücken und -temperaturen im Grossmassstab ausgetestet werden. Das Entstehen von Falten in der Membrane durch die vielen Druckschwankungen kann in diesem System ausgeschlossen werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass sich kein Druck infolge Diffusion hinter der Membrane aufbaut. Dieser könnte bei einem Druckablass im Innern der Kaverne zu einem Abreissen der Membrane führen. Es müsste somit eine Luftdrainage in der Trägerschicht installiert werden um diesen Druckaufbau zu verhindern.

#### 2.3.2.5. Vergleich der Systeme

Es zeigt sich, dass auch massive Schutzfolien bei den extrem hohen Drücken und den maximalen Temperaturen ein Risiko aufweisen, die Abdichtungsbahn nicht ausreichend vor Beschädigungen zu schützen. Auch die Steifheit und das Gewicht der Schutzbahn stellen hohe Anforderungen an die Montage und Befestigung.

Um die Befestigungsproblematik zu lösen, wurde eine Alternative mit gängigen verklebten Produkten angedacht. Diese zweite oben beschriebene Lösung bedingt eine möglichst glatte Trägerschicht. Dies soll durch das Abtaloschieren des noch frischen Spritzbeton erreicht werden. Dazu wird das Erhärten des Spritzbetons weniger beschleunigt als üblich und gleich nach dem Applizieren mittels einer üblichen Talosche geebnet. Dies soll erlauben, eine dünnere Schutzschicht einzusetzen. Das Aufkleben von SikaTape auf den Beton ist eine bewährte und geprüfte Methode, welche eine hochfeste Verbindung garantiert. Die Schutzfolie kann anschliessend an die SikaTape Streifen und die Abdichtungsfolie an die Schutzfolie thermisch geschweisst werden. Bei der Verschweissung verschmelzen sich die Materialien und es entsteht eine Verbindung, welche die Materialfestigkeit sogar übertrifft.

Auch bei einer lose verlegten Abdichtung, welche punktuell befestigt wird, bleiben offene Fragen. Wie werden sich mögliche Falten unter den hohen Drücken verhalten und welche Ermüdungserscheinungen können durch die vielen Druckschwankungszyklen hervorgerufen werden? Die Temperaturunterschiede zwischen Einbau und Betrieb werden zu einer thermischen Ausdehnung und Kontraktion des Kunststoffes führen. Hierbei können sich Falten bilden. Um das Faltenrisiko zu eliminieren, wird die dritte Lösung mit Sika Combiflex in Betracht gezogen. Es handelt sich hier um ein bewährtes weitverbreitetes Produkt, welches vollflächig an die Trägerschicht verklebt wird. Dies erlaubt eine einfache Installation und mögliche kleinere Unebenheiten werden durch den Epoxykleber ausgeglichen. Eine flächige Ausdehnung infolge von Temperaturschwankungen wird durch die vollflächige Verklebung verhindert. Als Alternative zu Sika Combiflex kann auch eine Abdichtungsbahn basierend auf SikaTape verwendet werden. Diese hat den Vorteil, dass sie etwas weniger temperaturanfällig ist.

Basierend auf diese Überlegungen wird angeraten, ein vollverklebtes System (wie z.B. das dritte oben beschriebene System) weiter zu verfolgen. Dieses sollte in anwendungsorientierten Versuchen genauer



getestet werden um eventuelle weitere Probleme zu identifizieren. Auch Neuentwicklungen in Bezug auf die Applikation und Befestigung sollten in einer nächsten Phase analysiert werden.

#### 2.3.2.6. Kosten

Die drei Systeme unterscheiden sich in den Kosten. Es muss beim ersten System auf die noch offenen Fragen der Befestigungsproblematik hingewiesen werden, die die Kosten beeinflussen. Deshalb sind die in Tabelle 7 aufgeführten geschätzten Kosten der drei Abdichtungssysteme mit hohen Ungenauigkeiten behaftet.

Tabelle 7: Geschätzte Kosten der drei Abdichtungssysteme.

System	CHF/m <sup>2</sup>
SikaPlan WP 1100-30 (3 mm) mit 1.4 cm Gummi-Schutzmatte inkl. Spritzbeton-Trägerschicht	430.-
SikaPlan WP 1100-30 (3mm) mit 4 mm Schutzmembrane mittels Sika WP Tape und Epoxykleber am Untergrund befestigt inkl. abtalschierte Spritzbeton-Trägerschicht	350.-
Sika Combiflex 2 mm mittels Epoxykleber am Untergrund befestigt inkl. abtalschierte Spritzbeton-Trägerschicht	450.-

#### 2.3.2.7. Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle zur Sicherstellung der Integrität der Abdichtungsschicht verläuft für alle drei vorgestellten Varianten ähnlich. Die erste Stufe der Qualitätskontrolle ist die visuelle Kontrolle der Schweissnähte durch geschultes Personal. So können grobe Fehler lokalisiert und behoben werden. Danach werden die Schweissnähte wie folgt getestet:

- Bei einem linearen Übergang von einer Abdichtungsbahn zur nächsten werden die aneinander liegenden Teile mit einer doppelten Schweissnaht so verschweisst, dass ein geschlossener Hohlraum entsteht. Dieser Hohlraum wird dann mit Druckluft gefüllt und es wird kontrolliert, dass keine Luft entweicht. Der geschlossene Hohlraum muss nach erfolgreicher Prüfung einseitig aufgeschlitzt werden, damit bei einem schnellen Druckabfall in der Kaverne der Schweissnahtkanal, in welchem sich der Druck durch Diffusion aufbauen könnte, nicht unkontrolliert aufreisst.
- Die Integrität der T-Stösse wird mit Hilfe einer Vakuumglocke kontrolliert und sichergestellt. Abbildung 15 zeigt die beiden Methoden zur Qualitätskontrolle.



Abbildung 15: Qualitätskontrolle der Schweissnähte. Bei linearen Übergängen der Abdichtungsbahn (links) wird das Volumen zwischen der doppelten Schweissnaht unter Druck gesetzt und auf Entweichen kontrolliert. An einem T-Stoss (rechts) wird die Integrität der Schweissnähte mit einer Vakuumglocke sichergestellt.



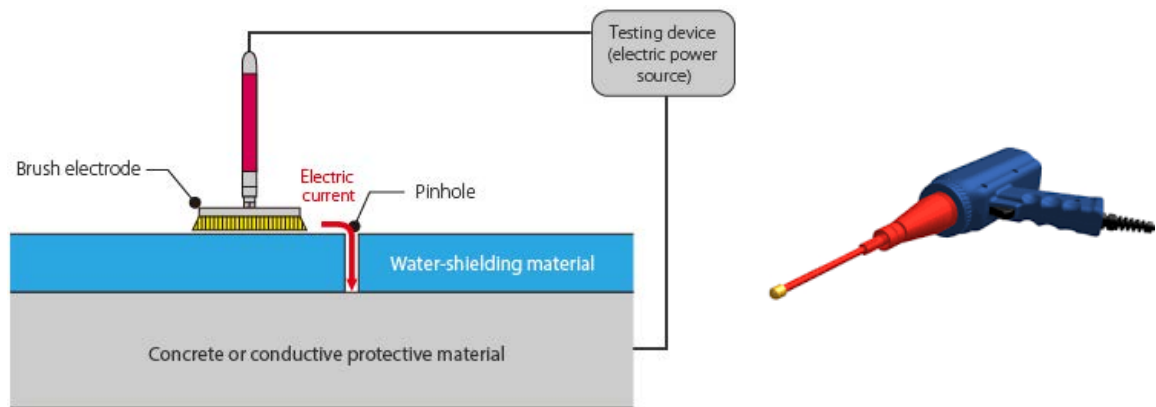


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Funkenprüfung (links) und Funkenprüfgerät (rechts).

Bei der dritten Variante mit der vollverklebten Abdichtung kann zusätzlich eine Prüfung der Schweissnähte mittels Funksprung erfolgen. Dabei wird die Erdung der Trägerschicht hinter der Folie genützt und die Vorderseite mit einem Funkenprüfgerät abgefahren, siehe Abbildung 16. Diese Funkenprüfgeräte arbeiten auf Basis hochfrequenter Wechselstrom-Hochspannung und zeigen undichte Schweissstellen visuell und akustisch sicher an.

### 2.3.3 Leitungen und Installationen in der Druckzone

Um Leckagen zu vermeiden, sollte die Abdichtungsbahn möglichst nicht durchdrungen werden. Das hat zur Folge, dass die Leitungen und Installationen vom Boden aus gestützt werden müssen und nicht an der Decke aufgehängt werden können, da dies eine Verankerung im Felsen und somit eine Durchdringung der Abdichtungsbahn benötigen würde. Für die Platzierung der Wärmespeicher wiederum wurde in Abschnitt 2.3.2.3 beschrieben, wie die Bodenplatte präpariert werden muss, um Schäden an der Abdichtungsbahn zu vermeiden.

### 2.3.4 Inspektion und Unterhalt

Grundsätzlich liegen keine Elemente im Hochdruckbereich der Anlage, welche eine regelmässige Wartung oder Inspektion benötigen. Die Lebensdauern von hochwertigen Abdichtungen wie die oben beschriebenen liegen bei über 100 Jahren.

### 2.3.5 Identifikation und Ortung von Leckagen

Leckagen die gross genug sind, um in der Massenbilanz aufzufallen, können zwar einfach identifiziert werden, aber deren Ortung kann trotzdem sehr aufwendig sein; d.h. es ist zwar bekannt, dass aus der Kaverne Luft entweicht, aber es ist nicht klar, wo sie entweicht. Kleinere Leckagen, die in der Massenbilanz nicht auffallen (kleiner als die Genauigkeit der Messvorrichtung), werden voraussichtlich keine wirtschaftliche Relevanz haben, sollten aber trotzdem so frühzeitig wie möglich identifiziert werden, da sie sich mit der Zeit vergrössern und somit problematisch werden können. Die grösste Herausforderung ist, dass zurzeit unklar ist, wie sich ein Riss in der Abdichtung verhalten wird. Es ist z.B. nicht klar, ob das Entweichen der Luft ein Pfeifen verursacht und ob der Riss auf der Abdichtungsbahn visuell erkennbar sein wird. Unter Berücksichtigung dieser Unbekannten wurden innerhalb des Projektteams, sowie mit Zühlke Technology Group und Google (Zürich) verschiedene Lösungsansätze in Brainstorming-Sitzungen diskutiert und in Betracht gezogen. Die im Folgenden aufgeführten Konzepte sind mögliche Ansätze, die in einem zukünftigen Projekt genauer untersucht werden müssten. Vor allem müsste man in einer Testanlage das Verhalten von Rissen verschiedener Grössen untersuchen und diese kategorisieren, damit bekannt ist, wonach in einer Anlage gesucht werden muss.



Aus wirtschaftlichen Gründen sollten die Ortung sowie die Reparatur von Leckagen wenn möglich während dem Betrieb der Anlage durchgeführt werden, ohne den Druck in den Kavernen ablassen zu müssen. (Ein Druckablass würde die Anlage für mehrere Tage bis Wochen ausser Betrieb setzen.) Dafür sollte am besten die Ruhephasen des Betriebs benutzt werden (zwischen den Lade- und Entladephasen), wo weder Luft zu- noch abgeführt wird.

#### 2.3.5.1. Visuelle Ortung

Die visuelle Ortung kann aufgrund von Farbkontrasten in der Abdichtungsfolie erfolgen. Die Abdichtungsfolie wird immer zweifarbig hergestellt, mit einer sehr dünnen Signalschicht (0.2 mm), welche zum Beispiel hellgelb ist und sich damit deutlich von der schwarzen Abdichtungsbahn unterscheidet. Durch den Kontrast wird die visuelle Lokalisierung von Beschädigungen erleichtert. Dafür muss die gesamte Kavernenoberfläche kontinuierlich mit Kameras beobachtet werden. Die daraus resultierenden Bilder können mit Bilderkennungsalgorithmen verarbeitet werden, die auf die Identifikation von Farbkontrasten spezialisiert sind. Ein Nachteil der visuellen Lokalisierung ist, dass Risse in den Abdichtungsbahnen, die unterhalb der betonierten Bodenplatte liegen (siehe 2.3.2.3), nicht geortet werden können.

#### 2.3.5.2. Ortung mittels farbigem Rauch

Eine Alternative könnte die Lokalisierung durch farbigen Rauch sein, der während der Ruhephase produziert wird und sich in den Kavernen ausbreitet. Der durch eine Undichtheit entstandene Luftstrom würde den Rauch in Richtung der Undichtheit saugen und könnte diese somit lokalisierbar machen. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass auch Undichtheiten unterhalb der Bodenplatte erkannt werden könnten. Wahrscheinlich können sehr kleine Leckagen mit dieser Methode nicht lokalisiert werden.

#### 2.3.5.3. Akustische Ortung

Alternativ wäre der Einsatz von Mikrofonen vorstellbar, die die an der Leckagestelle entstehenden Geräusche (d.h. mögliches Pfeifen der entweichenden Luft) mittels Triangulation lokalisieren können. Ähnliche Konzepte werden für die Ortung von Leckagestellen in Wasserleitungen mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit seit Jahrzehnten eingesetzt. Auch dieses System müsste in der Kaverne eingebaut sein, um die Ortung während der Ruhephasen zu erkennen.

#### 2.3.5.4. Thermographie

Das Entweichen der Luft durch die Leckagestelle wird eine lokale Temperaturänderung verursachen, die mit Hilfe von schwenkbaren Infrarotkameras, die die gesamte Kavernenoberfläche beobachten, erkannt werden könnte. Wenn die Temperaturänderung zu gering ist (weil der Druckabfall z.B. erst weiter im Fels oder an einer anderen Schwachstelle entsteht), kann es sein, dass sie nicht mit Infrarotkameras detektiert werden kann.

#### 2.3.6 Reparatur von Leckagen

Wie für die Ortung von Leckagen sollte auch deren Reparatur soweit wie möglich ohne Betriebsunterbruch stattfinden. Hierfür könnte eine in der Kaverne permanent platzierte Drohne inkl. Ladestation – die hohen Drücken standhalten kann – vorgesehen werden. Wenn die Stelle der Leckage lokalisiert wurde (siehe oben), kann die Drohne zur Leckagestelle geflogen werden, um den Riss zu reparieren. Für die Reparatur könnte entweder eine Abdichtung auf die Leckagestelle gespritzt oder eine Art «Abdichtungspflaster» auf den Riss geklebt werden. Leckagen unterhalb der Bodenplatte würden einen Betriebsunterbruch und ein Betreten der Kaverne bedingen.

Falls der Einsatz von Drohnen nicht ausreicht, um die Leckage zu reparieren, muss der Druck in der Kaverne abgelassen und die Kaverne anschliessend für die Reparatur betreten werden. Um an die Stelle der Leckagen zu gelangen, wird für die Variante «Schacht» die vertikalbewegliche seilgeführte Plattform eingesetzt, die für die Installation der Abdichtung benutzt wurde. Für die Variante «Kaverne»



wird die Hebebühne mit ausfahrbarer Plattform eingesetzt, die wiederum auch für die Installation der Abdichtung benutzt wurde. Für Leckagen im Tunnelbereich der Variante «Kaverne/Tunnel» werden wegen dem kleineren Tunneldurchmesser von 10 m einfachere Lösungen (z.B. Leitern) benutzt werden können.

#### 2.3.7 Ausblick

Verschiedene Abdichtungen wurden auf ihre Luftdichte bei Drücken von 100 bar getestet. Es zeigt sich, dass die herkömmlichen PVC und TPO Dichtungsbahnen den Anforderungen genügen. Verschiedene Systeme unterscheiden sich jedoch grundsätzlich durch ihre Applikationsart. Es soll ein System ausgewählt werden, das sicher und einfach befestigt werden kann und bei den hohen Drücken keinen Schaden nimmt.

Das Verhalten des Abdichtungssystems inkl. Schweissnähten und Befestigung muss untersucht werden. Die notwendigen Erfahrungen können einzig in Versuchen mit realitätsnahen Hohlräumen und unter realistischen Bedingungen, d.h. rund 40°C und 100 bar, erarbeitet werden. Gerade bei T-Stössen ist es möglich, dass sich kritische Lufteinschlüsse bilden. Es hat sich gezeigt, dass die in diesem Projekt eingesetzte Prüfapparatur keine «grössere» durch Undichtheiten hervorgerufene Luftflüsse bewältigen kann und somit das Verhalten von Undichtheiten nicht präzise untersucht werden konnte. Es muss für die nächste Forschungsetappe eine Anlage entwickelt werden, mit welcher mögliche Undichtheiten unter realistischen Bedingungen untersucht werden können.

Auch das Verhalten von möglichen Drainageschichten unter den hohen Anpressdrücken sollte untersucht werden. Diese Drainageschicht soll garantieren, dass sich kein Wasserdruck auf der Aussenseite der Membrane aufbaut, weil sich das bei einem Druckablass problematisch auswirken könnte. Die Drainageschicht kann auch bei einer geeigneten Ausbildung als Indikator für Druckluftverluste gebraucht werden.

## 2.4 Konstruktion von Speicherhöhlräumen

Die aus felsmechanischer Sicht wichtigsten Faktoren wurden untersucht, um eine geeignete Auslegung des Speicherhohlraums im Gebirge zu erzielen. Dies beinhaltet die Festlegung der Abmessungen unter Beachtung geometrischer Vorgaben, eine geotechnische Beurteilung mit Vordimensionierung, eine Vorauswahl potentieller Standorte unter Berücksichtigung der geologischen Gegebenheiten sowie eine Abschätzung der Kosten für die Hohlraumerstellung.

#### 2.4.1 Geometrische Vorgaben

Die in der Abbildung 2 gezeigte DLSKW-Konfiguration beinhaltet neben den eigentlichen Hoch- und Niederdrucklufthohlräumen (HDHR bzw. NDHR) eine Maschinenkaverne (MK) und einen Stollen für den Lufteinzug während der Ladephase bzw. für den Luftablass während der Entladephase. Ebenfalls benötigt werden – je nach Variante – ein oder zwei Zugangsstollen für Bau und Unterhalt. Die Abmessungen der Hohlräume müssen die Unterbringung der Komponenten der DLSKW-Anlage erlauben, siehe Tabelle 8. Ferner müssen für den Bau und Unterhalt alle Hohlräume befahrbar sein (Lichtraumprofil 3.5



Tabelle 8: Geschätzte Abmessungen der DLSKW-Komponenten. Quelle für Abmessungen der Turbomaschinen: Dr. Philipp Jenny, MAN Energy Solutions Schweiz AG.

Hohlraum	Komponente	Anzahl	Länge/Breite oder Durchmesser [m]	Höhe [m]
HDHR	Wärmespeicher (TES)	4	17	20
NDHR	Wärmespeicher (TES)	4	17	20
MK	Niederdruckkompressor	1	30 / 16	11
	Hochdruckkompressor	1	15 / 12	11
	Niederdruckturbine	1	15 / 12	11
	Hochdruckturbine	1	15 / 12	11
	Transformator	1	15 / 12	11
	Wärmetauscher	2	15 / 12	11

x 4.5 m). Genauere Vorgaben zur Anlagenkonfiguration werden in einem möglichen Folgeprojekt definiert und könnten zu einer Anpassung bzw. Optimierung der Querschnitte führen.

#### 2.4.1.1. Hochdruckhohlraum

Der Hochdruckhohlraum (HDHR) muss ein freies Volumen von 177'000 m<sup>3</sup> aufweisen, damit die 500 MWh aus gespeicherter elektrischer Energie bereitgestellt werden können. Der Bemessungsdruck im Innern des HDHR liegt bei 10 MPa (100 bar). Bezüglich Abdichtung und Gebirgsspannungen sind abgerundete Querschnitte, d.h. entweder kugelförmige oder zylinderförmige Hohlräume, günstig.

Luftverluste sind potentiell für die Wirtschaftlichkeit entscheidend. Diese hängen direkt von der Grösse der druckluftbeaufschlagten Oberfläche ab. Bei gegebenem Speichervolumen würde ein kugelförmiger Hohlraum die kleinste Oberfläche aufweisen, wäre aber in der Herstellung wesentlich aufwändiger und teurer als ein zylinderförmiger Hohlraum, weshalb er nicht weiter berücksichtigt wird. Bei einem gegebenen Speichervolumen nimmt die Oberfläche eines Zylinders mit zunehmendem Durchmesser ab. Daher sind grössere Durchmesser für den Betrieb günstiger.

Geotechnisch sind, in der gleichen Geologie, Hohlräume mit geringeren Durchmessern als weniger anspruchsvoll für den Bau einzustufen. Bei grösseren Durchmessern muss wegen der erhöhten Niederbruchgefahr mit einem grösseren Sicherheitsaufwand und deshalb mit höheren Kosten gerechnet werden. Je nach Abmessungen (Durchmesser und Länge) kann die Herstellung der Hohlräume maschinell (mit Tunnelbohrmaschine, TBM) kostengünstiger als konventionell (durch Bohr- und Sprengtechnik) erfolgen. Der maximale Durchmesser bei üblichen Maschinen ist jedoch begrenzt. Im Falle einer Schachtaufweitung beträgt dieser ca. 9 m während bei TBM im harten Gestein ca. 12 m möglich sind. Ein weiterer, und im vorliegenden Projekt potentiell wichtiger, Vorteil eines maschinellen Vortriebes besteht darin, dass beim Hartgestein die Oberfläche des Hohlraumes i.d.R. glatter ist als beim Sprengvortrieb. Im Sprengvortrieb muss die grössere Unebenheit der Ausbruchfläche mit Spritzbeton ausgeglichen werden, was zusätzliche Kosten verursacht.

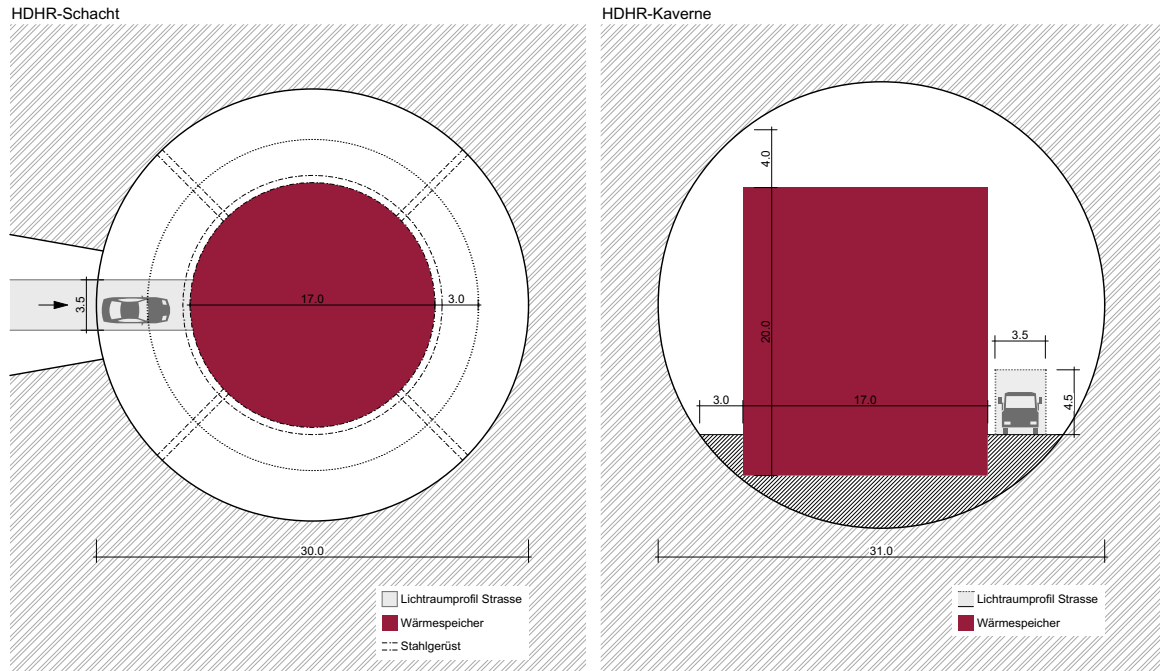


Abbildung 18: Grundriss des Schachts (links) und Querschnitt der HDHR-Kaverne (rechts).

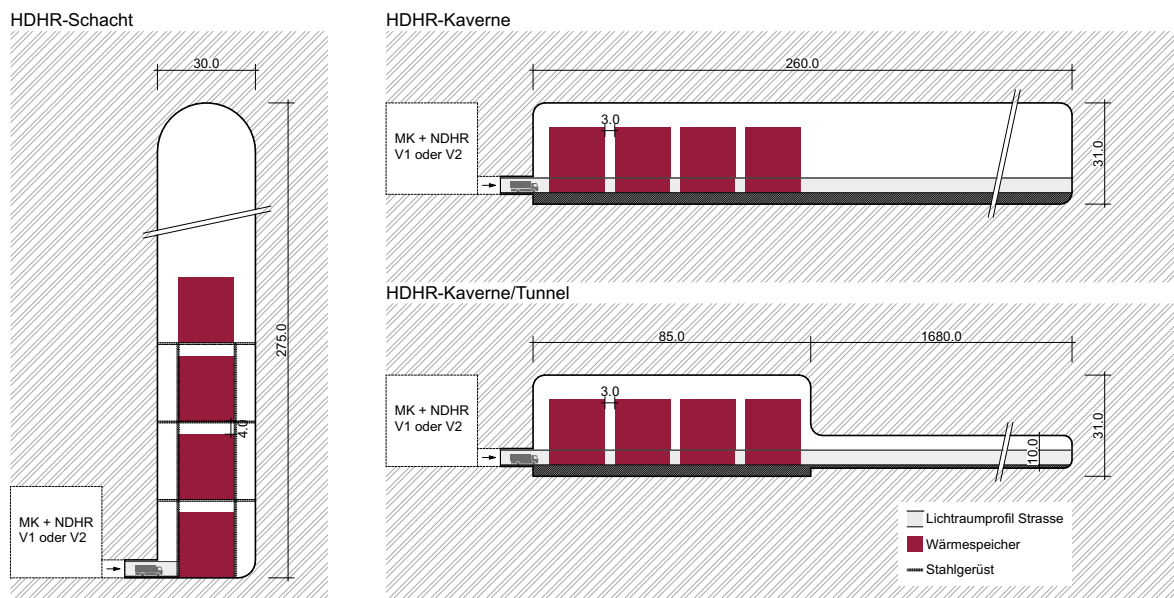


Abbildung 17: Seitenansichten der HDHR-Varianten.

In einem Bereich des HDHR müssen die vier Wärmespeicher (engl. Thermal Energy Storage, TES) untergebracht werden. Diese haben eine konische Form und werden vereinfacht als Zylinder mit den entsprechenden Aussenabmessungen angenommen, d.h.  $D_{TES} = 17 \text{ m}$  und  $H_{TES} = 20 \text{ m}$ . Ihr Volumen von ca.  $18'000 \text{ m}^3$  muss zusätzlich zum freien Volumen im HDHR zur Verfügung stehen. Daraus ergibt sich ein gesamtes erforderliches HDHR-Volumen von  $195'000 \text{ m}^3$ . Um Wärmeverluste zu reduzieren, müssen die Leitungen zwischen den Turbomaschinen und den TES möglichst kurzgehalten werden; deshalb werden die TES nahe am Eingang des HDHR platziert. Aus baulichen und betrieblichen Gründen betragen der seitliche Mindestabstand der TES zur Hohlraumwand 3 m und die freie Höhe oberhalb 4 m.

Die grossen Abmessungen der TES beeinflussen die Geometrie der HDLS. Grundsätzlich können die vier TES hintereinander (horizontale Anordnung) oder aufeinander (vertikale Anordnung) platziert werden. Für die horizontale Anordnung ergibt sich eine Kaverne mit einem Mindestdurchmesser von

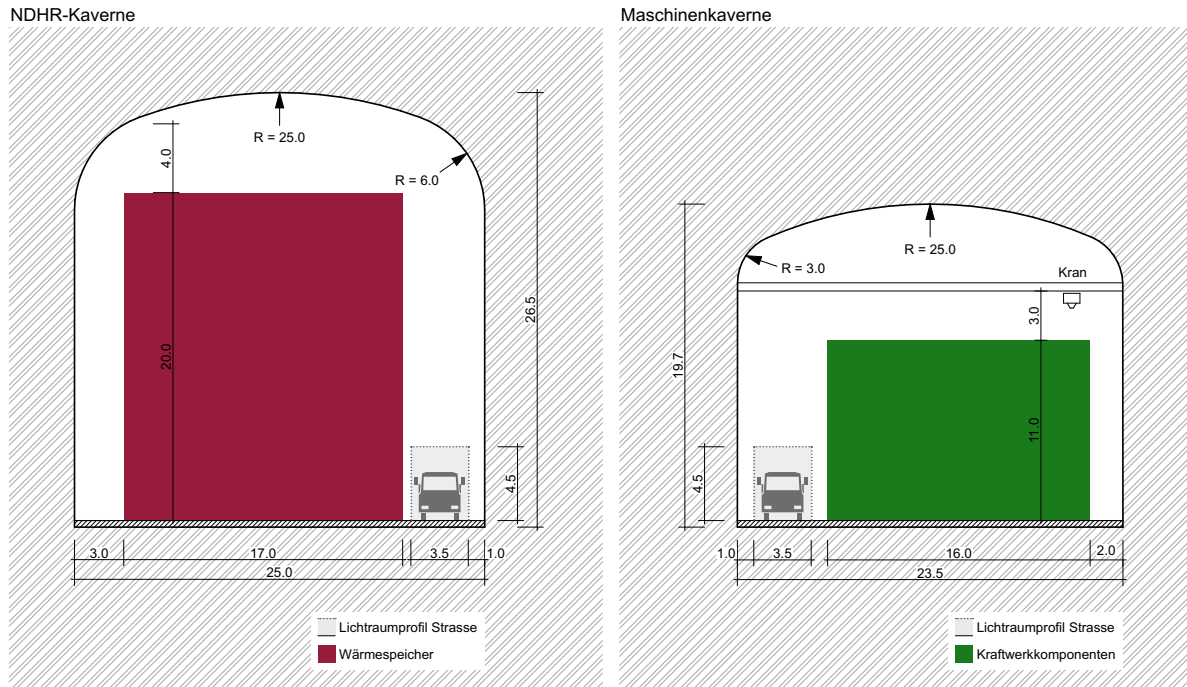


Abbildung 19: Querschnitte des NDHR und der Maschinenkaverne (die Abmessungen der Komponenten sind in Tabelle 8 aufgelistet).

ca.  $D = 31$  m (siehe Abbildung 18 rechts) und einer Länge von ungefähr 85 m. Werden die TES vertikal übereinander angeordnet, muss ein Schacht mit einem Minstdurchmesser von  $D = 23$  m und einer Höhe von ungefähr 100m gebaut werden. Aufgrund dieser Abmessungen ist sowohl für den Schacht als auch für die Kaverne der rein maschinelle Vortrieb ausgeschlossen.

Das übrige erforderliche Hohlraumvolumen kann als Erweiterung des ersten Bereiches gestaltet werden. Für den Schacht wird ein grösserer Durchmesser als der Minstdurchmesser vorgeschlagen (siehe Abbildung 18 links) um die Schachttiefe zu begrenzen.

Für die Kaverne wird der Minstdurchmesser verwendet. Alternativ hierzu könnte bei der Kavernenlösung der zweite Bereich aus einem zylinderförmigen Tunnel mit einem Durchmesser von 10 m bestehen. Der Vorteil dieser dritten Variante besteht darin, dass der Tunnel maschinell mit einer Hartgestein-Gripper TBM aufgeföhren werden kann. In Abbildung 17 werden die Seitenansichten der drei Varianten dargestellt.

#### 2.4.1.2. Niederdruckhohlraum und Maschinenkaverne

Im Gegensatz zum HDHR ist im Niederdruckhohlraum (NDHR) kein Bereich als reiner Luftspeicher notwendig. Der Wärmespeicherbereich erfordert Platz für ebenfalls vier TES mit gleichen Abmessungen wie beim HDHR, d.h.  $D_{TES} = 17$  m und  $H_{TES} = 20$  m (siehe Abschnitt 2.4.1.1). Unter Beachtung des niedrigen Bemessungsluftdruckes von  $p = 10$  bar (1 MPa) und der aufgrund übergeordneter Überlegungen vorausgesetzten guten Felseigenschaften, kann, anstatt eines aufwändig herzustellenden runden Querschnittes, ein kostengünstigerer rechteckiger Querschnitt mit abgerundeter Firste und Ecken im Sohlbereich gewählt werden, siehe Abbildung 19 links.

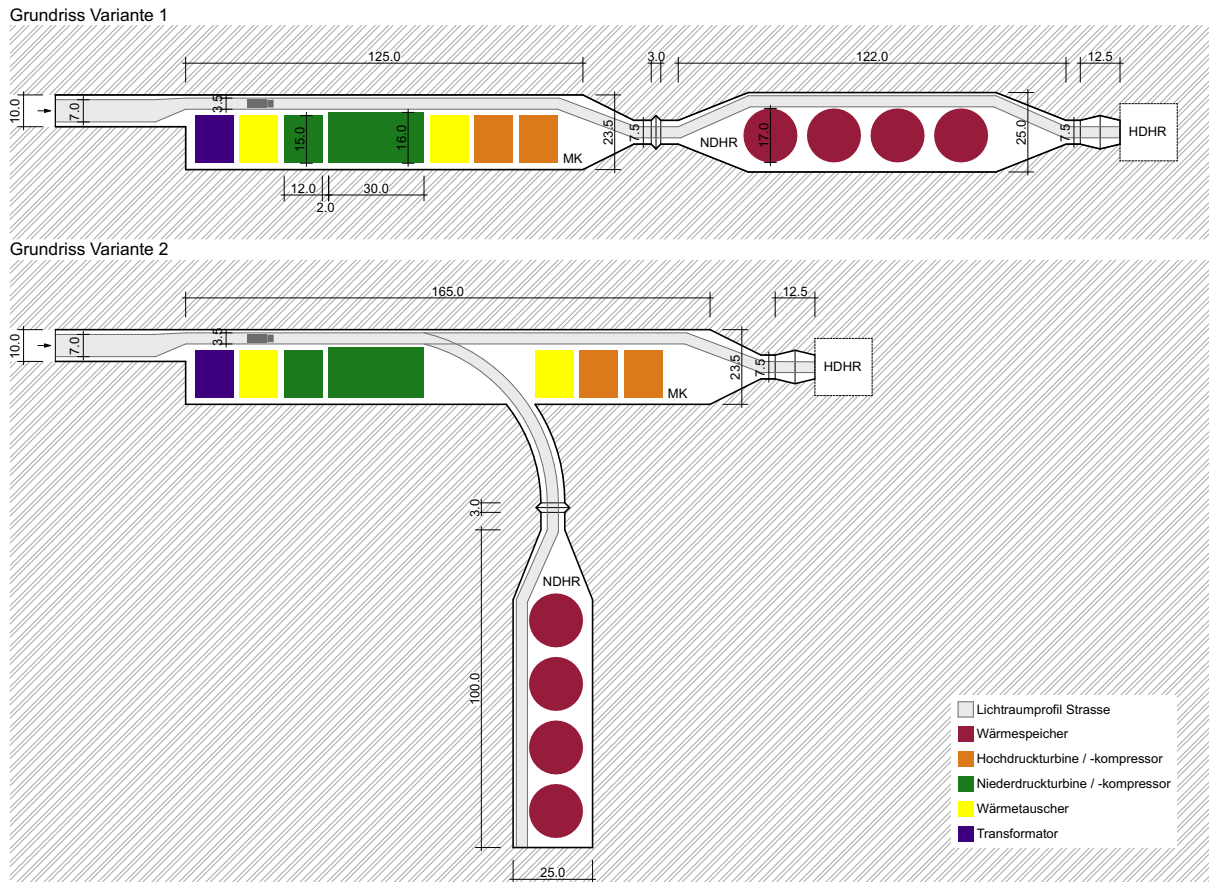


Abbildung 20: Grundrisse der zwei Varianten zur Anordnung des NDHR und der Maschinenkaverne.

In der Maschinenkaverne herrscht atmosphärischer Druck. Die Abmessungen der Kaverne ergeben sich aus dem Platzbedarf für Turbinen, Kompressoren und Wärmetauscher sowie eines Transformators (siehe Tabelle 8). Für die Installation und Wartung der Turbomaschinen ist ein Portalkran mit einer Kranhöhe 14 m und einer Traglast von 100 t erforderlich (Abbildung 19 rechts). Genauere Vorgaben zur Anordnung der Komponenten in der Kaverne müssen in einem möglichen Folgeprojekt definiert werden und könnten zu einer Anpassung bzw. Optimierung der Abmessungen der Kaverne führen.

Abbildung 20 zeigt zwei mögliche Anordnungsvarianten im Grundriss. Bei der Variante 1 werden alle Kavernen entlang einer Achse angeordnet. Die Variante 2 sieht eine senkrechte Anordnung der NDHR zur Hauptachse vor. Vorteilhaft bei der letzteren Variante sind die kürzeren Entfernungen zwischen den TES und den jeweiligen Turbinen bzw. Kompressoren, insbesondere für den HDHR. Ferner müssen durch den Pfropfen im Niederdruckbereich weniger Leitungen geführt werden. Daher wird diese Variante bevorzugt. In einem möglichen Folgeprojekt wird der Abstand zwischen HDHR und NDHR unter Berücksichtigung der lokalen Gebirgsverhältnisse angepasst werden.

#### 2.4.1.3. Zugangsstollen und Lufteinzugs-/Ablassstollen

Der Zugangsstollen zur Maschinen- und Niederdruckkaverne stellt den Hauptzugang des DLSKW dar. Während der Bauphase dient dieser der Schutterung des Ausbruchsmaterials und dem Transport der Baugeräte und der Maschinen des DLSKW. In der Betriebsphase kann der Personaltransport für die Bedienung und Wartung des DLSKW, wie auch den Lufteinzug bzw. -ablass der Anlage durch diesen Zugangsstollen erfolgen. Die Abbildung 21 zeigt den geplanten Stollenquerschnitt für den unteren Zugangsstollen.





#### Zugangsstollen

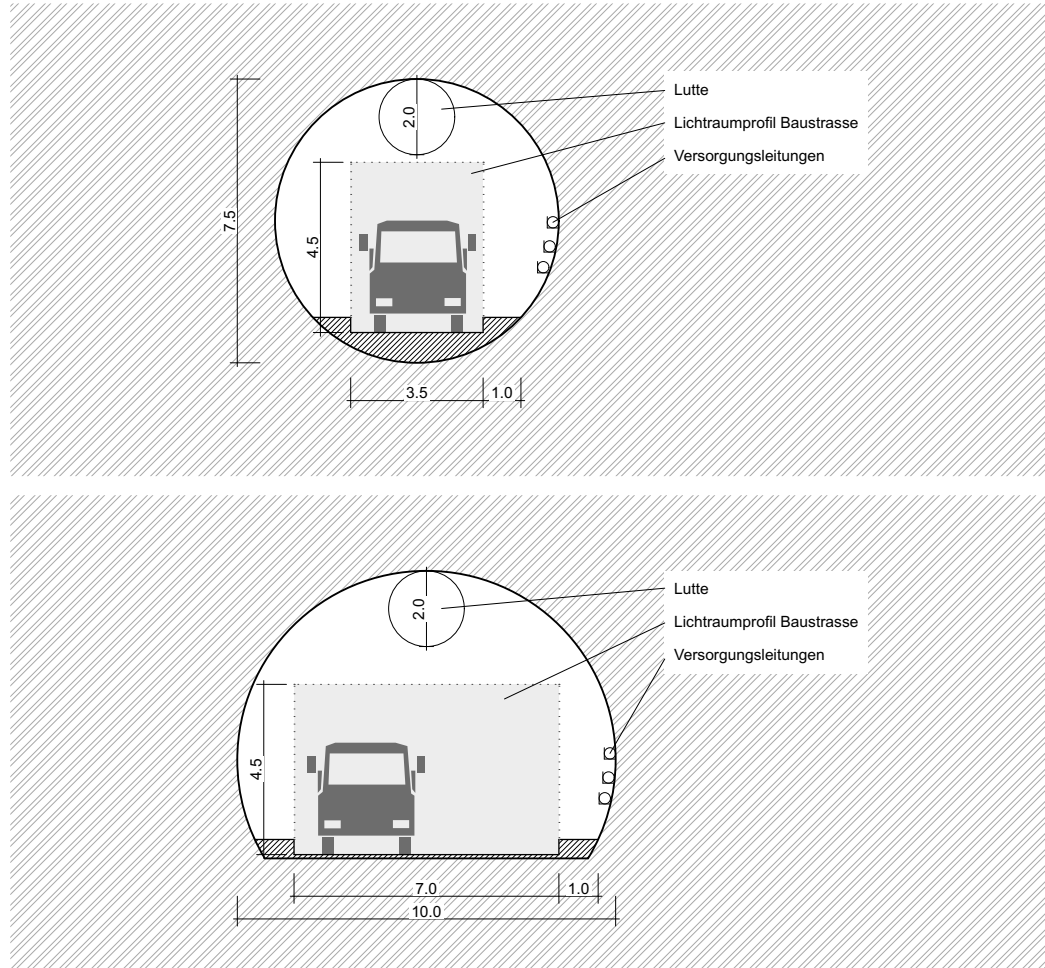


Abbildung 21: Stollenquerschnitt unter atmosphärischem Druck (oben) und bei Pfropfen (unten).

Die Wahl eines grösseren Querschnittes ist sowohl für den Bau als auch für den Betrieb der Anlagen vorteilhaft. Bei einem zu geringen Durchmesser wäre die Luftgeschwindigkeit im Stollen zu hoch um ihn gleichzeitig als Personenzugang zu nutzen. Die Alternative des Baus eines Zusatzstollens für den Lufttransport bzw. Personenzugangs wäre wirtschaftlich ungünstiger. Die Luftgeschwindigkeit entlang des Tunnels hängt von seiner Querschnittsfläche und der zu transportierenden Luftmasse pro Zeiteinheit ab. Eine einfache, auf der Annahme einer zeitunabhängigen isentropen Strömung basierende, Abschätzung ergab für einen Massenstrom von 200 kg/s und einem Stollendurchmesser von 10 m eine Luftgeschwindigkeit von etwa 2 m/s (7.2 km/h), siehe Abbildung 22.

Aufgrund des grossen Ausbruchvolumens erfordert die Schacht-Variante für den effizienten Bau einen zusätzlichen Zugang im Schachtkopf (siehe Abschnitt 2.4.3.3). Während der Bauphase des HDLS werden durch diesen oberen Zugangsstollen Gerätschaften wie Bohrgeräte transportiert. Der vorgängig ausgebrochene zentrale Teil des Schachtes dient als Schütterschacht, so dass nahezu das gesamte Ausbruchsvolumen des HDLS über den unteren Zugangsstollen geschüttet werden kann. Aus diesem Grund muss beim oberen Zugang nur verhältnismässig wenig Ausbruchmaterial geschüttet werden. Diese Arbeitsweise hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. In der Betriebsphase wird dieser Stollen nur für die Wartung der Abdichtungsmembrane des HDLS benötigt. Dafür genügt voraussichtlich ein 5 m breiter und 5 m hoher Hufeisenquerschnitt.



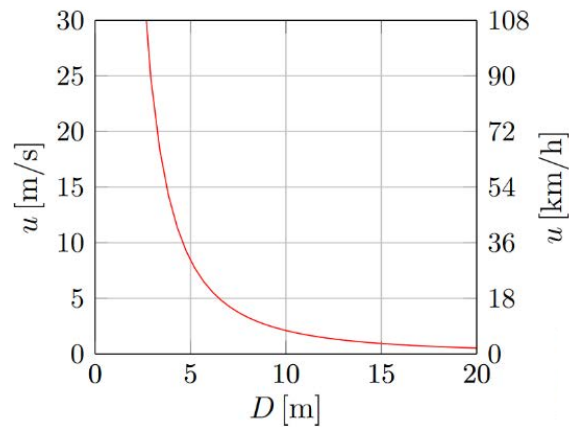


Abbildung 22: Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Stollendurchmessers unter der Annahme einer zeitunabhängigen isentropen Strömung für  $\dot{m} = 200 \text{ kg/s}$ ,  $\rho_0 = 1.209 \text{ kg/m}^3$  und  $T_0 = 288.15 \text{ K}$ .

#### 2.4.2 Gebietseingrenzung für die Standortwahl

Die Wirtschaftlichkeit eines DLSKW kann stark vom Standort abhängen. Daher werden nicht alle möglichen Standorte innerhalb der Schweiz angegeben, sondern nur die voraussichtlich kostengünstigeren, insbesondere hinsichtlich der geologisch-geotechnischen Bedingungen. Die stufenweise Eingrenzung der potentiellen Standorte erfolgt über ein Geoinformationssystem (GIS) und den folgenden Kriterien:

1. Geologisch-geotechnische Bedingungen,
2. Abstand zum bestehenden Hochspannungsnetz, und
3. Gebiete mit vorhandenem Wissen über das Gebirge (Nähe zu bestehenden Untertagebauten).

Unter Verwendung der geologischen Karte der Schweiz (Massstab 1:50'000) [21] werden nur die Gebiete ausgewählt, die oberflächennah Gebirge mit erwartungsgemäss sehr guter Qualität aufweisen. Aus diesem Grund werden nur Gebiete mit magmatischen Gesteinen oder metamorphen Gesteinen magmatischen Ursprungs berücksichtigt. Gebiete mit Lockergestein und Festgesteinen sedimentären Ursprungs werden ignoriert. Weitere eingrenzende Faktoren wie Verwitterungsgrad oder geologische

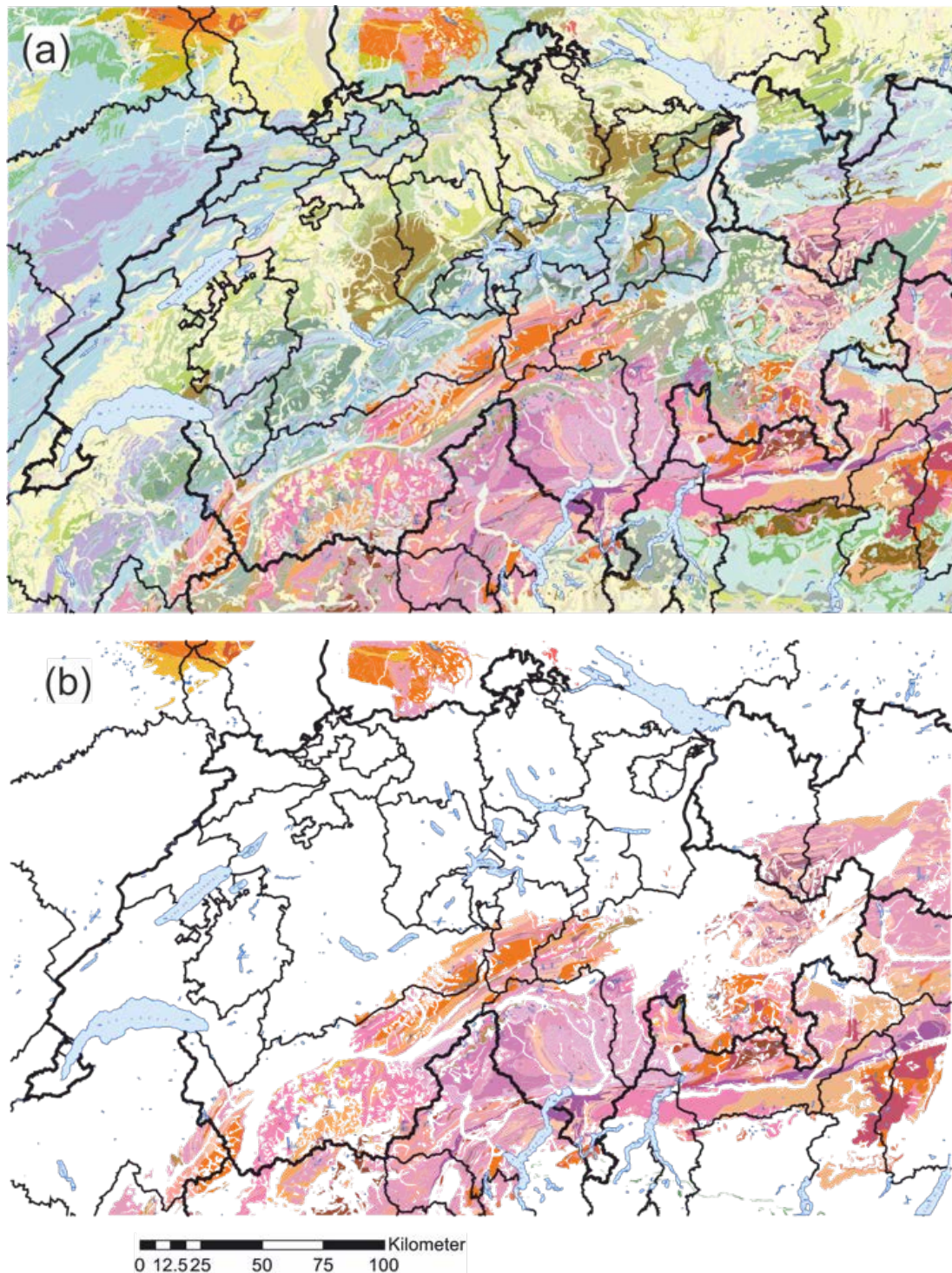


Abbildung 23: (a) Geologische Karte der Schweiz (siehe Anhang 5.2 für die Legende mit den Gesteinstypen); (b) eingegrenzte Gebiete aufgrund der erwartungsgemäss sehr guten Gesteinsqualität [22] [21].

Störzonen werden nur für ausgewählte Standorte untersucht. Die Abbildung 23 zeigt die gesamte geologische Karte (Eingangsdaten) bzw. die durch das Kriterium Geologie eingegrenzten Gebiete.

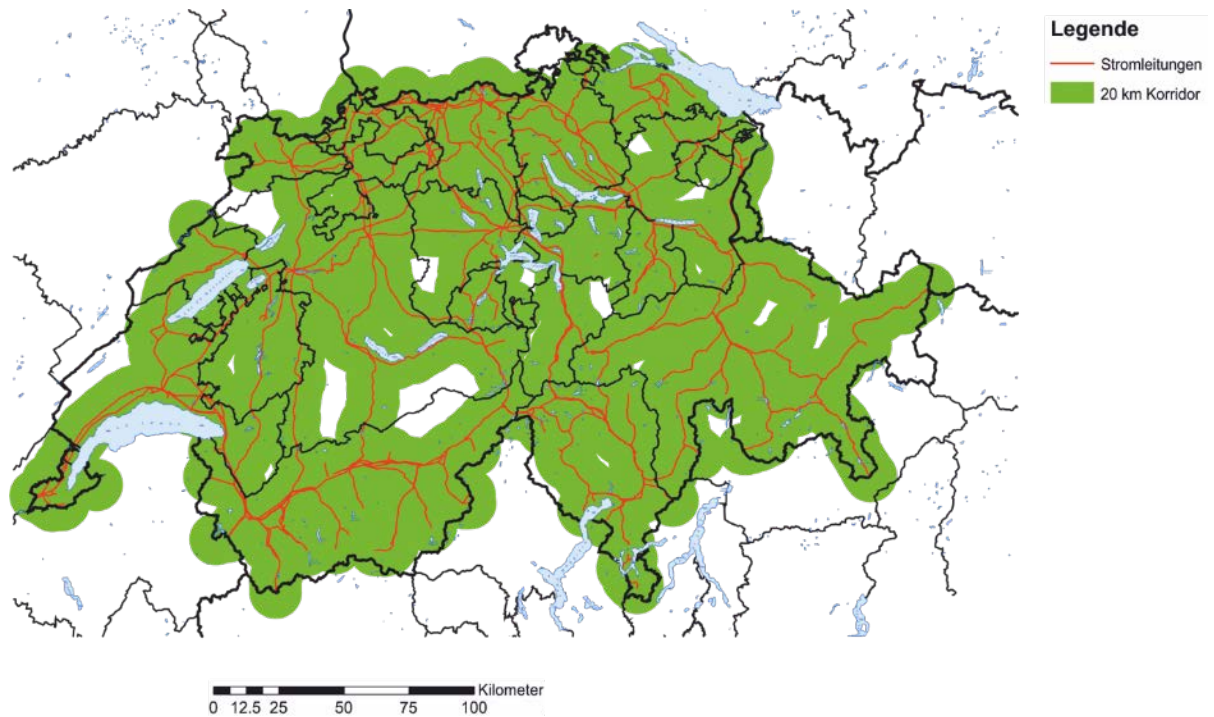


Abbildung 24: 20 km Korridor um bestehendes Hochspannungsnetz [22] [21].

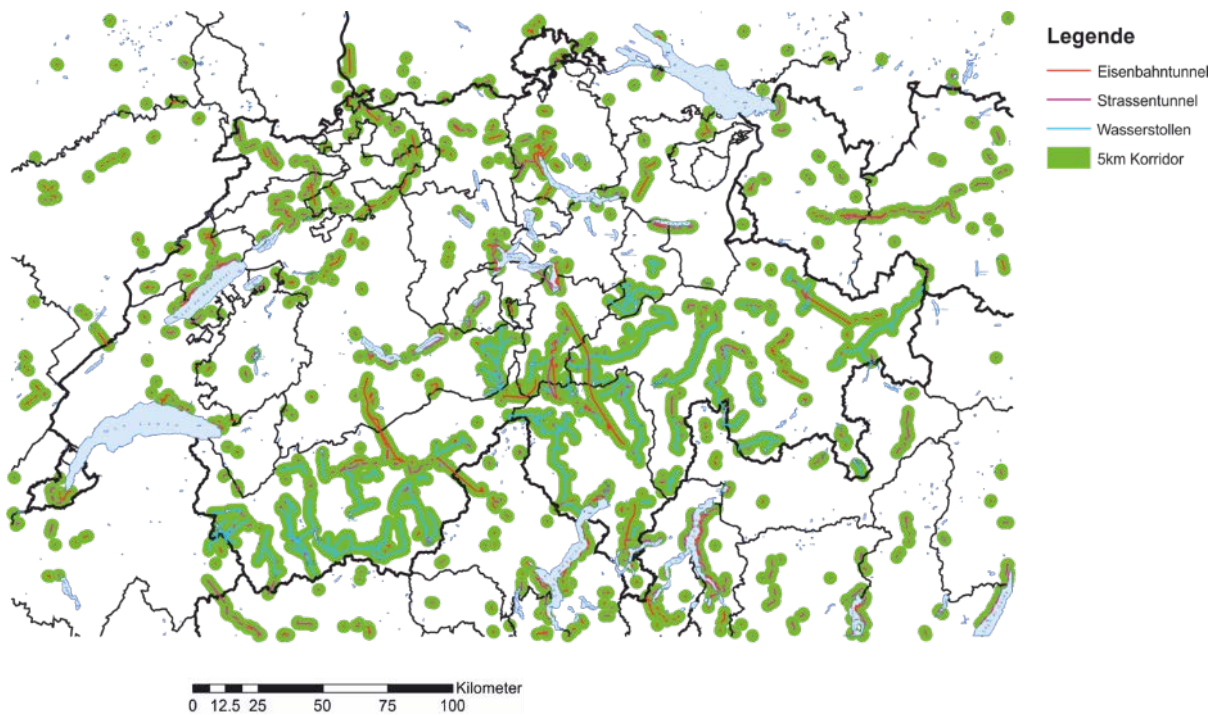


Abbildung 25: 5 km Korridor um bestehende Untertagbauten [22] [21] [23].

Um die Anschlusskosten zu begrenzen, soll der Abstand zum bestehenden Hochspannungsnetz 10 km nicht überschreiten. Aus diesem Grund werden nur die Standorte, die sich innerhalb eines 20 km (je



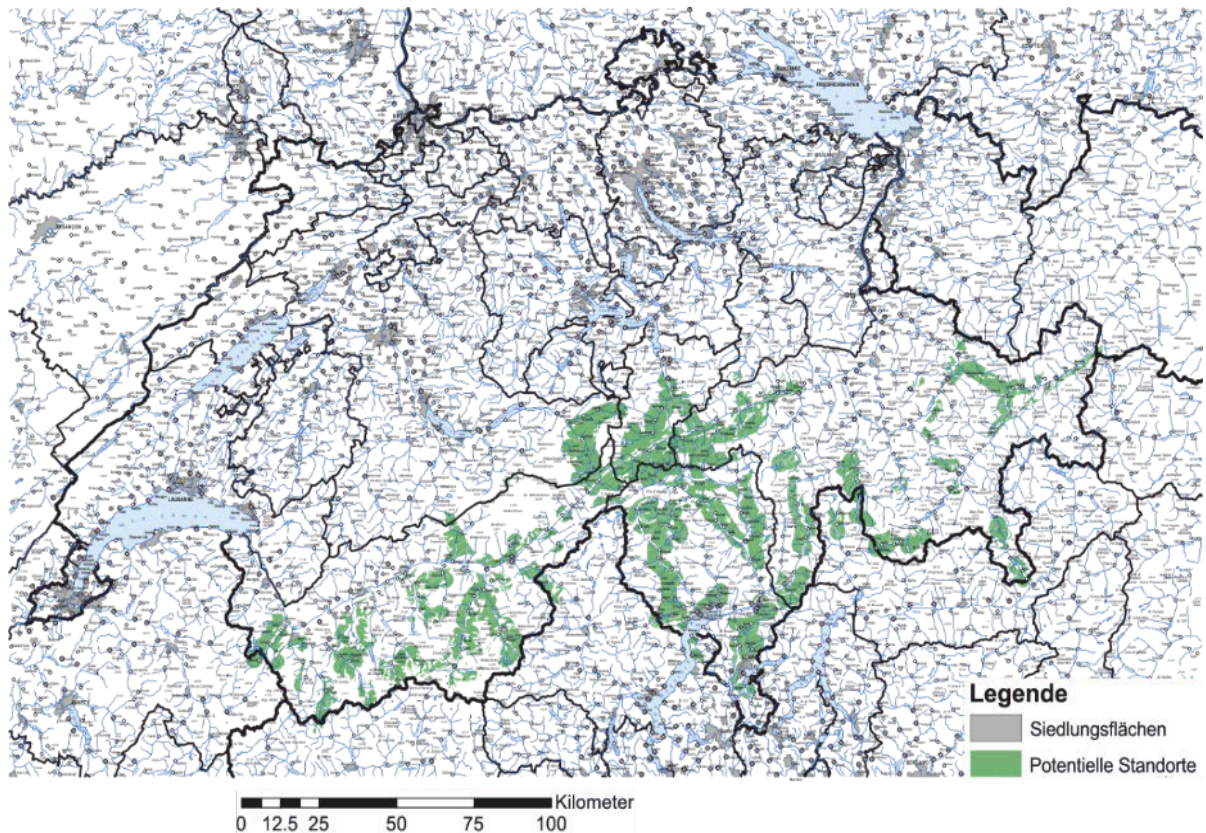


Abbildung 26: Potentielle Standorte aus der Kombination geologischer und geometrischer Kriterien.

10 km links und rechts) breiten Korridors entlang aller Hochspannungslinien [22] befinden, berücksichtigt (grüne Fläche in Abbildung 24). Aufgrund des dichten Stromnetzes der Schweiz ist dieses Kriterium nicht entscheidend (ausgeschlossen werden nur kleine Gebiete; weisse Flächen in Abbildung 24).

Zur Erhöhung der Planungssicherheit zum heutigen Zeitpunkt werden Standorte nah zu bestehenden Untertagbauten wie Wasserkraftwerken oder Verkehrstunneln bevorzugt [23] [22] [24]. Das Informationsmaterial aus der Planung und dem Bau dieser Untertagbauten erhöht die Zuverlässigkeit der Beurteilung des Gebirges in dieser frühen Projektstufe erheblich. Ferner ist zu vermerken, dass die unterirdischen Bauwerke der Wasserkraftanlagen (vor allem Kavernen) in der Regel in bautechnisch günstigem Gebirge erstellt wurden, wodurch diese Standorte als potentiell gut geeignet anzusehen sind. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den o.g. Erkundungen und Kartierungen wird zunächst auf 2.5 km geschätzt, d.h. analog zum zweiten Kriterium wurde ein 5 km breiter Korridor entlang der bestehenden Untertagbauten betrachtet (siehe Abbildung 25). Um den Aufwand zu reduzieren, wurde der Verlauf des Stollennetzes der Wasserkraftwerke nur in Gebieten mit prognostizierter guter Geologie (Abbildung 23b) erfasst. Abbildung 26 zeigt die Standorte, welche die drei Kriterien erfüllen.

Unter Beachtung geologischer und geometrischer Kriterien bietet das Aare-Massiv beste Voraussetzungen für eine erfolgreiche Suche nach konkreten Standorten für einen DLSKW. Besonders vorteilhaft hierbei sind die Aufzeichnungen aus Erkundung und Bau der Untertagbauten der NAGRA (Felslabor) und der KWO Kraftwerke (siehe z.B. [25], [26]). Aufgrund dieser Aufzeichnungen kann das Massiv mehrheitlich als kompakt mit wenigen Trennflächen eingestuft werden.



### 2.4.3 Geotechnische und rohbautechnische Beurteilung und Vordimensionierung

Aus geotechnischer Sicht werden Standorte bevorzugt, die sehr gute geologische Verhältnisse aufweisen (siehe Abschnitt 2.4.2). Hierbei wird vorausgesetzt, dass insbesondere im Bereich und Umgebung des HDHR das Gebirge störfreie ist und nur von einzelnen, mehrheitlich geschlossenen Klüften durchzogen wird. Ferner werden den guten geologischen Verhältnissen entsprechende Materialkennwerte angenommen (Tabelle 9). Eine allfällige Zugfestigkeit des Gebirges wird konservativ vernachlässigt. Für das in Abschnitt 2.4.2 ausgewählte Aarmassiv sind diese Anforderungen erfüllt [27] [28].

Tabelle 9: Gebirgsparameter für Standorte mit sehr guten geologischen Verhältnissen.

Gebirgsparameter	Einheit	Kennwert
Raumgewicht $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\approx 25$
Einachsige Druckfestigkeit $\sigma_D$	[MPa]	$\geq 100$
Reibungswinkel $\phi$	[°]	$\geq 35$
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	$\geq 5$
E-Modul	[GPa]	$\geq 20$

Die Hohlräume des DLSKW, die nicht mit hohem Luftdruck beaufschlagt werden, können als Standardbauwerke eingestuft werden und bedürfen keiner weiteren Untersuchung in dieser Projektphase. Die massgebenden Gefährdungsbilder beim HDHR sind: Rissöffnung im Fels infolge des Luftdruckes; unkontrolliertes Ausweichen der komprimierten Luft aufgrund eines Aufbrechens. Bei den Absperrbauwerken (Betonpfropfen) sind die massgebenden Gefährdungsbilder: Rissbildung im Fels, im Bereich wo die Kräfte vom Betonpfropfen auf das Gebirge übertragen werden (Widerlagerbereich); Überbeanspruchung im Beton und Scherversagen des Betonpfropfens. Bei der Kombination von Kaverne und Tunnel für den HDHR wird der Tunnel aufgrund seines kleineren Durchmessers im Vergleich zur Kaverne bei gleicher Ausrichtung geotechnisch nicht massgebend sein bei der Beurteilung der Gefährdungsbilder. Aus diesem Grund wird diese Variante für die geotechnische Beurteilung nicht gesondert betrachtet.

#### 2.4.3.1. Rissbildung im Fels

Abhängig vom Luftdruck und den Gebirgsspannungen können sich während der Druckluftbeaufschlagung bestehende Klüfte öffnen oder neue Risse am Hohlraumrand des HDHR entstehen. Je nach Rissöffnung und -tiefe kann dies zu einem Abscheren der Membrane oder zu einem Einklemmen dieser in dem sich teilweise schliessenden Riss nach dem Luftdruckablass führen. Letzteres könnte bei zyklischer Belastung ebenfalls zu einer Beschädigung und zum Verlust der Dichtigkeit der Membrane führen. Die Folge wäre eine aufwändige Detektion und Lokalisierung der Undichtigkeit mit anschliessender Reparatur der Membrane.

Klüfte im Fels können sich nur öffnen, wenn die Druckluftbeaufschlagung zu Zugspannungen am Hohlraumrand führt. Dies kann jedoch bei entsprechend hoher Gebirgsspannung, dass bedeutet beim Einhalten einer Mindestüberlagerung  $H_{min}$ , ausgeschlossen werden. Andererseits ist eine Begrenzung der Gebirgsspannung von Vorteil, um eine Überbeanspruchung (Plastifizierung) des Gebirges am Hohlraumrand zu verhindern. Bei Beschränkung der Überlagerung auf maximal  $H_{max}$  wird ein elastisches Verhalten des Gebirges gewährleistet. In Standorten mit sehr guten geologischen Verhältnissen ist demnach eine rissfreie Aufnahme des Luftdruckes im HDHR möglich, falls die Überlagerung zwischen  $H_{min}$  und  $H_{max}$  beträgt. Dies setzt voraus, dass die Höhe des HDHR (Schacht: 275 m und Kaverne: 31 m) kleiner als die Differenz aus  $H_{max}$  und  $H_{min}$  ist. Falls diese Bedingung nicht erfüllt sein sollte, wäre

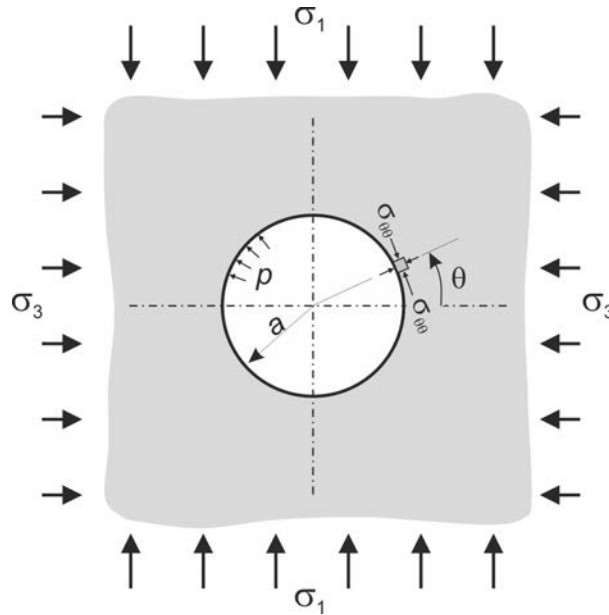


Abbildung 27: Statisches System und Randbedingungen für die Berechnung der Tangentialspannungen.

dies kein Ausschlusskriterium. Es bedeutet nur, dass Fels-Sicherungsmaßnahmen für die Standsicherheit des Hohlraumes oder Änderungen des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Schichtaufbaus erforderlich wären, was die Baukosten negativ beeinflussen würde.

Nachfolgend werden  $H_{min}$  und  $H_{max}$  sowohl für die Schacht- als auch für die Kavernenvariante bestimmt. Hierbei wird elastisches Materialverhalten angenommen. Vereinfacht wird als Modell eine gelochte Scheibe gemäss Abbildung 27 betrachtet. (In der Geotechnik wird folgende Vorzeichenkonvention verwendet: (+) Druckspannungen und (-) Zugspannungen.) Die tangentialen Spannungen am Hohlraumrand  $\sigma_{\theta\theta}$  hängen nur von den Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  (wobei  $\sigma_1 \geq \sigma_3$ ) und von der Position entlang des Hohlraumrandes ab. Letztere wird durch den Winkel  $\theta$  definiert (Abbildung 27). Die Kirsch-Lösung für  $\sigma_{\theta\theta}$  am Hohlraumrand lautet:

$$\sigma_{\theta\theta} = (\sigma_1 + \sigma_3) + 2(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2\theta). \quad (4-1)$$

Demnach ist  $\sigma_{\theta\theta}$  als tangential Druckspannung maximal bei  $\theta = 0$  bzw.  $180^\circ$  und minimal bei  $\theta = 90^\circ$  bzw.  $270^\circ$ . Sie beträgt:

$$\sigma_{\theta\theta(\theta=0)} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad (4-2)$$

$$\sigma_{\theta\theta(\theta=90^\circ)} = 3\sigma_3 - \sigma_1. \quad (4-3)$$

Durch den Luftdruck  $p$  im HDHR reduzieren sich entsprechend die tangential Druckspannungen zu:

$$\sigma_{\theta\theta(\theta=0)} = 3\sigma_1 - \sigma_3 - p, \quad (4-4)$$

$$\sigma_{\theta\theta(\theta=90^\circ)} = 3\sigma_3 - \sigma_1 - p. \quad (4-5)$$

Es wird angenommen, dass die Hauptspannungen der primären vertikalen und horizontalen Spannungen  $\sigma_v$  bzw.  $\sigma_h$  entsprechen. Erstere hängt von der Überlagerungshöhe  $H$  und dem Raumgewicht des Gebirges  $\gamma$  ab:

$$\sigma_v = \gamma H. \quad (4-6)$$





Dagegen hängt  $\sigma_h$  zusätzlich noch von den topographischen Gegebenheiten (z.B. Nähe zum Tal) oder von der Orogenese (z.B. Tektonik) ab. Daher wird  $\sigma_h$  bzw. das Verhältnis zwischen diesen Spannungen in der Regel nur geschätzt. Letzteres wird als Seitendruckbeiwert  $K_0$  definiert:

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}. \quad (4-7)$$

Da der Spannungszustand in der Horizontalebene nicht unbedingt hydrostatisch ist, wird zwischen dem maximalen und minimalen Seitendruckbeiwert  $K_{0max}$  bzw.  $K_{0min}$  unterschieden:

$$K_{0max} = \frac{\sigma_{hmax}}{\sigma_v}, \quad (4-8)$$

$$K_{0min} = \frac{\sigma_{hmin}}{\sigma_v}. \quad (4-9)$$

Die oben genannte Bedingung eines elastischen Materialverhaltens gilt, falls die maximale tangentielle Spannung am Hohlraumrand des leeren HDHR ( $p = 0$  in Gleichung 4-4) kleiner ist als die einaxiale Druckfestigkeit des Gebirges  $\sigma_D$ . Da diese mit der Überlagerung zunimmt (Gleichung 4-4), lässt sich unter Beachtung der einaxialen Druckfestigkeit die maximale Überlagerungshöhe  $H_{max}$  am tiefsten Punkt des Schachtes oder der Kaverne (Sohniveau) ermitteln. Welche Hauptspannungen in Gleichung 4-4 eingesetzt werden, hängt im Fall der Kaverne von der Ausrichtung des HDHR ab. Es ist zu vermerken, dass bei der gelochten Scheibe die axiale Spannung unberücksichtigt bleibt. Diese entspricht für die jeweiligen Varianten einer der Primärspannungen (d.h. im Falle der Schachtvariante der vertikalen Spannung und für die Kavernenvariante der horizontalen Spannung in axialer Richtung). Für die Bestimmung der Maximalüberlagerungen ist die Axialspannung in der Regel nicht massgebend<sup>6</sup>. In Tabelle 10 werden die Fälle und die entsprechenden Hauptspannungen zusammengefasst.

Wie bereits oben erwähnt, können sich nur dann vorhandene Klüfte öffnen oder sich neue Risse bilden, falls die Tangentialspannung auf null reduziert wird. Die kleinste Tangentialspannung am Ausbruchsrund tritt bei  $\theta = 90^\circ$  auf (Gleichung 4-5), d.h. um Rissöffnungen auszuschliessen, muss die minimale Überlagerung am höchsten Punkt des Hohlraums (Firstniveau) die Bedingung erfüllen, dass die Tangentialspannung gemäss Gleichung 4-5 positiv bleibt. Analog zur oben beschriebenen Bestimmung der maximalen Überlagerung muss zwischen Variante, Ausrichtung und Grösse des Seitendruckbeiwertes  $K_0$  unterschieden werden. Daher werden für die Schachtvariante die maximale und minimale Horizontalspannung als Hauptspannungen berücksichtigt, während bei der Kavernenvarianten die Vertikalspannung und fallweise die maximale oder die minimale Horizontalspannung massgebend sind (Tabelle 10).

<sup>6</sup> Gültig für Seitendruckbeiwerte  $K_{0max} \geq K_{0min} \geq 0.5$  bzw.  $K_{0max} \leq 2$  und  $K_{0min} \leq 1$ .



Tabelle 10: Hauptspannungen zur Bestimmung der Maximalüberlagerung ab Sohlniveau (Gl. 4-2) und der Minimalüberlagerung ab Firstniveau (Gl. 4-5) je nach Situation und Variante. \*Dass beide horizontalen Hauptspannungen grösser als die Vertikalspannung sind, gilt als unwahrscheinlich.

Variante	Ausrichtung	$K_{0max}$	Hauptspannungen	
			$\sigma_1$	$\sigma_3$
Schacht	vertikal		$\sigma_{hmax}$	$\sigma_{hmin}$
Kaverne	parallel zu $\sigma_{hmax}$	$K_{0min} \leq 1$	$\sigma_v$	$\sigma_{hmin}$
		$K_{0min} > 1^*$	$\sigma_{hmin}$	$\sigma_v$
	parallel zu $\sigma_{hmin}$	$K_{0max} \leq 1$	$\sigma_v$	$\sigma_{hmax}$
		$K_{0max} > 1$	$\sigma_{hmax}$	$\sigma_v$

Im NAGRA Felslabor wurde eine der wenigen Versuchskampagnen zur Bestimmung der in-situ Spannungen durchgeführt [29]. Die Ergebnisse der durchgeführten Spannungsmessungen ergaben, dass die maximale Spannung  $\sigma_1$  nach Osten fällt und ihr Betrag zwischen 13 und 17 MPa variiert. Ferner verläuft die kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  subhorizontal in Nord-Süd Richtung. Der Betrag der mittleren Hauptspannung  $\sigma_2$  entspricht den von  $\sigma_3$  (8 – 10 MPa) sowie auch der Überlagerung. Demnach betragen die Seitendruckbeiwerte  $K_{0max} = 1.7$  und  $K_{0min} = 1.0$ . Es ist jedoch nicht klar, inwiefern und wie weit diese Werte sich auf das gesamte Grimselmassiv sowie weitere potentielle Standorte übertragen lassen. Aus diesem Grund wird für die Bestimmung der maximalen und minimalen Überlagerung unterschieden zwischen tektonisch mässig bis mittel überprägten Standorten ( $K_{0max} \leq 1.3$  und  $K_{0min} \geq 0.7$ ) und stark tektonisch überprägten Standorten ( $K_{0max} \leq 1.7$  und  $K_{0min} = 1.0$ ).

Wie Tabelle 11 zeigt, ist in allen untersuchten Fällen die Höhe des jeweiligen HDHR (Schacht: 275 m bzw. Kaverne: 31 m) kleiner als die Differenz aus  $H_{max}$  und  $H_{min}$  und somit wären sowohl der Schacht wie auch die Kaverne aus geotechnischer Sicht grundsätzlich geeignet, eine rissfreie Aufnahme des

Tabelle 11: Maximale Höhe ab Sohlniveau  $H_{max}$  und Mindestüberlagerung ab Firstniveau  $H_{min}$  je nach Variante und Situation.

Variante	Ausrichtung	$K_{0max}$	Situation			
			Tektonisch mässig bis mittel überprägtes Spannungsfeld ( $K_{0min} = 0.7$ , $K_{0max} = 1.3$ )		Tektonisch stark überprägtes Spannungsfeld (Bsp. Grimselmassiv Nord) ( $K_{0min} = 1$ , $K_{0max} = 1.7$ )	
			$H_{max}$ [m]	$H_{min}$ [m]	$H_{max}$ [m]	$H_{min}$ [m]
Schacht	vertikal	–	1250	<b>500</b>	976	308
Kaverne	parallel zu $\sigma_{hmax}$	$K_{0min} \leq 1$	1739	<b>364</b>	2000	200
		$K_{0min} > 1$	(in den untersuchten Fällen nicht gegeben)			
	parallel zu $\sigma_{hmin}$	$K_{0max} \leq 1$				
		$K_{0max} > 1$	1379	235	976	308



Luftdruckes zu gewährleisten. Die kleinste Mindestüberlagerung für die Schachtvariante wird für die Situation eines stark überprägten Spannungsfeldes zu 308 m ermittelt. Für die Kavernenvariante ist die Mindestüberlagerung minimal für die Ausrichtung des HDHR parallel zu  $\sigma_{hmax}$  und  $K_{0min} = 1.0$  und beträgt 200 m. Die grösste Mindestüberlagerung wird für die Situation eines tektonisch mässig bis mittel überprägten Spannungsfeldes ( $K_{0max} = 1.3$  und  $K_{0min} = 0.7$ ) ermittelt und beträgt für die Schacht- und Kavernenvariante 500 m bzw. 364 m. Die Schachtvariante ist in beiden Situationen ungünstiger, weil die Differenz zwischen den zwei massgebenden Hauptspannungen am grössten ist.

Diese Resultate verdeutlichen die Bedeutung einer genaueren Kenntnis des in-situ Spannungszustandes für die Bestimmung der erforderlichen Überlagerung und der damit verbundenen Länge der Zugangsstollen des HDHR. Sollten keine ausreichend detaillierten in-situ Spannungsmessungen am geplanten Standort durchgeführt werden können, so ist konservativ von der maximalen Mindestüberlagerung nach Tabelle 11 auszugehen, d.h. eine Mindestüberlagerung von 364 m ab Firstniveau für die Kaverne und 500 m für den Schacht. Weil unbekannt ist, inwiefern die Resultate der Spannungsmessung im Grimsel-Felslabor übertragbar sind, wird die berechnete maximale Mindestüberlagerung auch für den Standort Grimsel verwendet.

Die maximale Höhe ab Sohlniveau  $H_{max}$ , d.h. die Höhe unterhalb derer elastisches Gebirgsverhalten erwartet wird (Tabelle 4), wurde für sehr gute geologische Verhältnisse ( $\sigma_D = 100$  MPa, Tabelle 9) bestimmt. Bei weniger guten Verhältnissen wäre die zulässige maximale Überlagerung kleiner ( $H_{max}$  nimmt proportional mit der einaxialen Gebirgsfestigkeit ab), darf aber die Summe aus  $H_{min}$  und Höhe des jeweiligen HDHR (Schacht: 275 m bzw. Kaverne: 31 m) nicht unterschreiten. Für diesen Grenzfall ( $H_{max} = H_{min} + \text{Höhe HDHR}$ ) und die in Tabelle 11 jeweils aufgelisteten grössten  $H_{min}$  errechnet sich somit die erforderliche einaxiale Mindestgebirgsfestigkeit für die Schacht- und die Kavernenvariante zu 62 MPa bzw. 23 MPa. D.h. bei weniger guten geologischen Verhältnissen könnte aus geotechnischer Sicht, je nach Spannungsverhältnissen im Gebirge, die Kavernenvariante besser geeignet sein, da eine niedrigere Festigkeit und Überlagerung ( $H_{min}$  in Tabelle 11) ausreichen würde.

Bei den oben beschriebenen Analysen wird keine Sicherung des Hohlraumes berücksichtigt. Für seine globale Standsicherheit ist dies aufgrund der Annahme sehr guter geologischer Verhältnisse nicht erforderlich. Mögliche lokale Bruchkörper<sup>7</sup> müssen entsprechend gesichert werden (z.B. durch Netze, Spritzbeton oder Anker).

#### 2.4.3.2. Rissbildung im Schichtaufbau

Der in Abschnitt 2.3 beschriebene Schichtaufbau besteht aus einer Träger- und Ausgleichsschicht aus bewehrtem Spritzbeton, einer Schutzschicht und einer Abdichtungsschicht. Im Gegensatz zum Gebirge, dass unter den oben genannten tangentialen Druckspannungen vorgespannt ist, wird der gesamte Schichtaufbau spannungsfrei (d.h. bei atmosphärischem Druck) im HDHR aufgebracht. Unter Vernachlässigung der Steifigkeit des Schichtaufbaus entspricht die maximale Dehnung der Abdichtungsschicht infolge der durch den Luftdruck  $p$  verursachten Tangentialdehnung des Gebirges am Ausbruchrand  $\varepsilon_{\theta\theta}$ .

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{p(1+\nu)}{E}. \quad (4-10)$$

Bei einem Gebirgselastizitätsmodul  $E = 20$  GPa und einer Querdehnungszahl  $\nu = 0.25$  beträgt diese Umfangsänderung 0.065% bzw. 6 cm bei 30 m Durchmesser. Da die Umfangsänderung invers-proportional zum Elastizitätsmodul ist, würde bei einem halb so hohen Gebirgselastizitätsmodul ( $E = 10$  GPa)

<sup>7</sup> Unter Bruchkörper versteht man ein Gesteinskörper, der durch als durchgehend angenommene Trennflächen begrenzt ist und der sich auf Grund seiner Position, der Raumstellung der ihn umgebenden Trennflächen und der auf ihn wirkenden Kräfte aus dem Gesteinsverband lösen kann.



eine doppelt so grosse Umfangsänderung (0.13%) auftreten, welche weiterhin als niedrig eingestuft wird. Da eher eine ungleichmässige Verteilung dieser Verformungen des Hohlraumes wegen lokaler Heterogenitäten des Felsens, Unregelmässigkeiten der Felsoberfläche und Imperfektionen in der Ausgleichsschicht zu erwarten sind, muss die Dehnbarkeit (d.h. die Bruchdehnung) der Abdichtungsschicht ein Mehrfaches von  $\varepsilon_{\theta\theta}$  betragen um ihre Integrität weiter zu gewährleisten. Hierbei wird angenommen, dass die Dehnbarkeit der Schutzschicht stets grösser ist als die der Abdichtungsschicht.

Unter Vernachlässigung der Steifigkeit der Schutzschicht und der Abdichtungsschicht betragen die durch den Luftdruck  $p$  verursachte Zugspannungen in der Ausgleichsschicht  $\sigma_{\theta\theta SB}$ :

$$\sigma_{\theta\theta SB} = p \frac{E_{SB}}{E_G} (1 + \nu) \frac{1}{\frac{d}{a} \frac{(1 + \nu) E_{SB}}{E_G} + 1} \cong p \frac{E_{SB}}{E_G} (1 + \nu). \quad (4-11)$$

Hierin bedeuten  $E_{SB}$  und  $d$  das Elastizitätsmodul und die Dicke der Ausgleichsschicht (SB = Spritzbeton). Demnach sind eine möglichst hohe Gebirgssteifigkeit und eine niedrige Steifigkeit  $E_{SB}$  vorteilhaft, da sie die Zugspannungen  $\sigma_{\theta\theta SB}$  entsprechend reduzieren. Sollte  $\sigma_{\theta\theta SB}$  kleiner sein als die Zugfestigkeit, dann würde die Ausgleichsschicht rissfrei bleiben.

Unter einem Luftdruck von 10 MPa sind die erwarteten tangentialen Zugspannungen in der Ausgleichsschicht hoch, selbst bei einer niedrigen Steifigkeit der Ausgleichsschicht und bei einer hohen Gebirgssteifigkeit. Zum Beispiel bei  $E_{SB} = 15$  GPa und  $E = 40$  GPa würde die Zugspannung in der Ausgleichsschicht 4.5 MPa betragen und somit ihre Zugfestigkeit überschreiten. Demzufolge muss von einer gerissenen Ausgleichsschicht ausgegangen werden. Eine günstige Rissverteilung (d.h. mehrere Risse aber dafür mit engeren Öffnungen) wird durch die Armierung erzielt. Hierbei ist zu beachten, dass (wie für den Teil Fels in 2.4.3.1 beschrieben) infolge der zyklischen Belastung durch den Betrieb des DLSKW, d.h. Öffnen und Schliessen der Risse in der Ausgleichsschicht, unterschiedliche Schäden auftreten können. Bei einer Überdehnung (plastisches Verhalten) der Bewehrung würde diese nicht in die Ursprungsform zurückkehren, sondern in Richtung des geringsten Widerstandes, d.h. in den Hohlraum hinein knicken und eine Ausbeulung der Schutzschicht und der Abdichtung verursachen. Da die Tangentialdehnung bei gutem Gebirge als niedrig eingestuft wird ( $< 0.13\%$ , siehe oben) ist dieser Schadensfall ausgeschlossen. Ferner ist in der Ausgleichsschicht nicht zu erwarten, dass mit der Entlastung die Risse sich gänzlich schliessen, so dass lokale ungleichförmige Verformungen in radialer Richtung, d.h. in den Hohlraum hinein, entstehen können. Dadurch könnte die anfänglich glatte Oberfläche der Ausgleichsschicht lokal im Rissbereich scharfkantig werden. Mit weiteren Belastungszyklen kann es zu einer Zermürbung dieser Bereiche der Ausgleichsschicht kommen. Da an diesen Stellen kein Verbund mehr besteht würde das zermürbte Material hinter der Schutzschicht soweit wie möglich fallen und «Taschen» aus losem Material bilden.

Ferner kann bei grossen Rissweiten die Schutzschicht durch den hohen Luftdruck in den Rissen eingedrückt und nach der Entlastung eingeklemmt oder gar abgeschert werden. Im letzten Fall wäre die Abdichtungsschicht ungeschützt und könnte bei den nachfolgenden Zyklen beschädigt und somit undicht werden. Da die Tiefe der Risse auf die Stärke der Ausgleichsschicht beschränkt bleibt (das Gebirge verhält sich weiterhin elastisch) und deren Öffnungsweiten durch die Armierung begrenzt wird kann bei ausreichender Dehnbarkeit der Schutzschicht dieser Schadensfall ausgeschlossen werden.

#### 2.4.3.3. Sicherheit gegen ein Aufbrechen

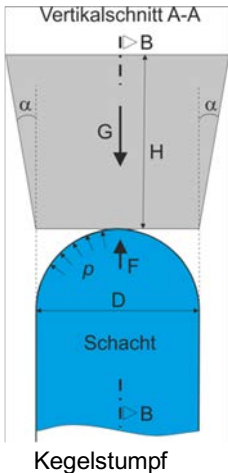
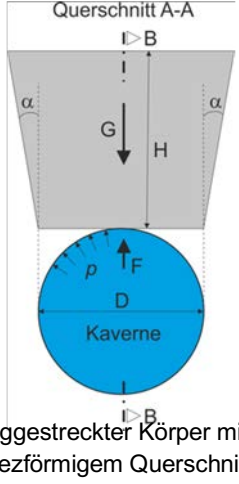
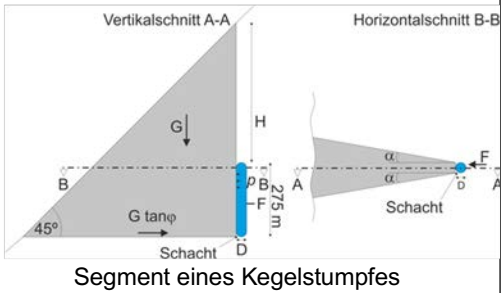
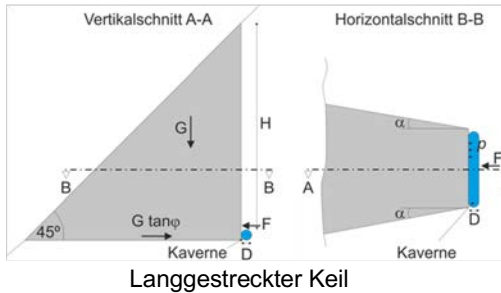
Die Untersuchungen in Abschnitt 2.4.3.1 basieren auf dem Modell einer unendlich ausgedehnten gelochten Scheibe. Dieses Modell kann Gefährdungsbilder, die durch die Nähe zur Gebirgsoberfläche bedingt sind, nicht erfassen. Insbesondere kann mit diesem Modell die Gefahr eines Aufbrechens des Gebirges während des Betriebes des DLSKW nicht untersucht werden. Unter Aufbrechen versteht man



ein infolge des Innendruckes im HDHR sich in Richtung Oberfläche lösender Felsbereich. Das Aufbrechen kann in vertikaler Richtung (Aufbrechen der Überlagerung) oder in horizontaler Richtung (Versagens des Gebirges seitlich des Tunnels) stattfinden, womit zwei unterschiedliche Versagensmechanismen bzw. zwei Gefährdungsbilder untersucht werden müssen. Das seitliche Versagen des Gebirges betrifft Hohlräume in der Nähe von Talflanken.

Beide oben genannte Gefährdungsbilder werden anhand eines Kräftegleichgewichts aus Widerständen und Einwirkungen am entsprechenden potentiellen Bruchkörper untersucht. Die Geometrie des betrachteten Bruchkörpers hängt von der Geometrie des Hohlraums (Schacht oder Kaverne) und der Entfernung zur Oberfläche bzw. von der Überlagerung ab. Als Widerstände gegen Aufbrechen werden – je nach Bewegungsrichtung – einzig das Eigengewicht des Gebirges und allfällige Reibungskräfte berücksichtigt, d.h. es werden konservativ die Kohäsion und die Zugfestigkeit des Felsens vernachlässigt. Die Komponente der aus dem Luftdruck im HDHR resultierenden Kraft  $F$  in die Bewegungsrichtung stellt die Einwirkung dar. Die betrachteten Bruchkörper sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die potentiell

Tabelle 12: Betrachtete Bruchkörper je nach Hohlraumform und Gefährdungsbild.

Gefährdungsbild	Hohlraumform	
	Schacht	Kaverne
Vertikales Aufbrechen	 <p>Vertikalschnitt A-A</p> <p>Kegelstumpf</p>	 <p>Querschnitt A-A</p> <p>Langgestreckter Körper mit trapezförmigem Querschnitt</p>
Seitliches Versagen in Richtung Tal	 <p>Vertikalschnitt A-A</p> <p>Horizontalschnitt B-B</p> <p>Segment eines Kegelstumpfes</p>	 <p>Vertikalschnitt A-A</p> <p>Horizontalschnitt B-B</p> <p>Langgestreckter Keil</p>
	Die Hangneigung wird vereinfacht gleich 45° angenommen.	
	Die Überlagerung $H^*$ bezieht sich auf Firstniveau des HDHR. Ab Sohle gemessen beträgt die Überlagerung $H^* = H + 275$ m (Schacht) bzw. $H^* = H + 31$ m (Kaverne).	



abgescherten Aussenflächen dieser Bruchkörper werden durch den Winkel  $\alpha$  in dieser Übersicht definiert, der hier konservativ gleich dem Dilatanzwinkel angenommen wird.

Die Beurteilung der Sicherheit gegen Aufbrechen des potentiellen Bruchkörpers erfolgt nach dem Konzept der globalen Sicherheit, d.h. der Sicherheitsfaktor wird als Verhältnis vom Widerstand zur Einwirkung definiert. Abbildung 28 zeigt den Sicherheitsfaktor  $v$  als Funktion der Überlagerung  $H$  für die zwei Gefährdungsbilder und die zwei Hohlraumformen. Im gleichen Diagramm wird auch die erforderliche Mindestüberlagerung zur Vermeidung einer Rissöffnung dargestellt (siehe Abschnitt 2.4.3.1). Dabei wird die Überlagerung ( $H_{min}$  in Abbildung 28) so gewählt, dass sie für alle betrachteten Kombinationen von  $K_0$  (Tabelle 10) ausreichend ist. Ein Sicherheitsfaktor gegen Aufbrechen von  $v = 2$  wird als ausreichend erachtet. Demnach ist sowohl für den Schacht als auch für die Kaverne die Rissbildung massgebend für die Bestimmung der erforderlichen Überlagerung  $H$ . Zusammenfassend betragen die Mindestüberlagerungen für die Varianten Schacht und Kaverne 500 m bzw. 364 m ( $H_{min\ Schacht}$  bzw.  $H_{min\ Kaverne}$  in Abbildung 28).

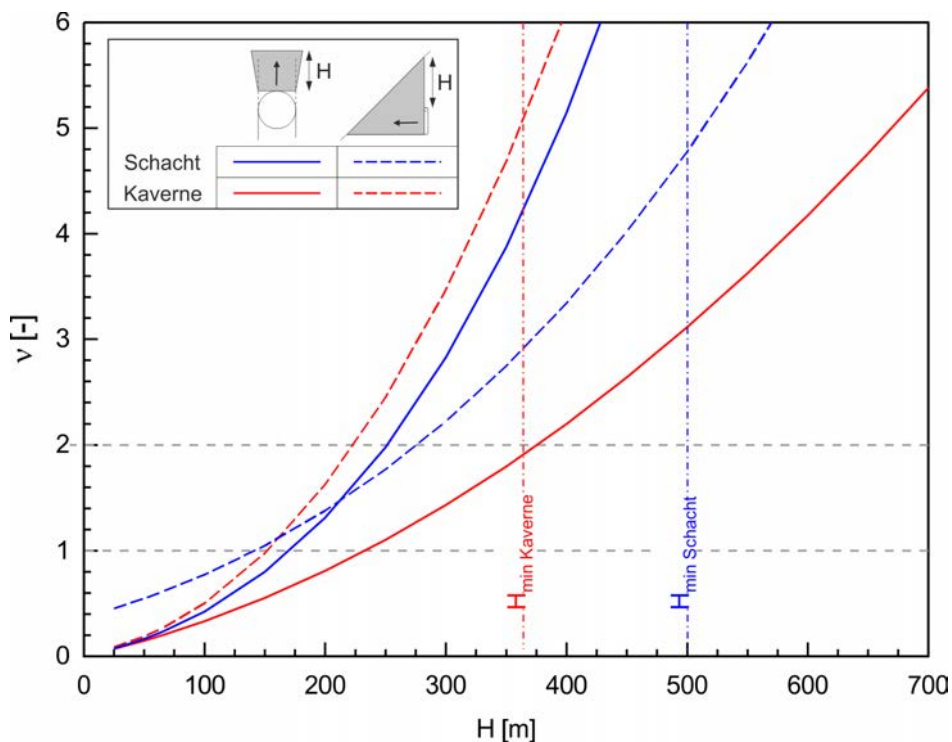


Abbildung 28: Sicherheitsfaktor gegen Aufbrechen in Abhängigkeit von der Überlagerung  $H$  ab Firstniveau des HDHR.

#### 2.4.3.4. Vordimensionierung der Betonpfropfen

In der Anlagenkonfiguration werden 2 oder 3 Betonpfropfen benötigt; im unteren Zugangsstollen für den Zugang des HDHR und des NDHR (alle Varianten) und im oberen Zugangsstollen für den Zugang des HDHR (nur bei der Schachtvariante). In diesem Projekt werden die Betonpfropfen im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsprüfung nur überschlagsmässig dimensioniert, um eine Kostenabschätzung zu ermöglichen. Aus diesem Grund werden einfache aber konservative Berechnungsmodelle ohne Sicherheitsbeiwerte gewählt. Abbildung 29 zeigt die angenommene Geometrie und Spannungsverteilung im Widerlagerbereich bzw. im Kontaktbereich zwischen Betonpfropfen und Fels. Der Betonpfropfen wird



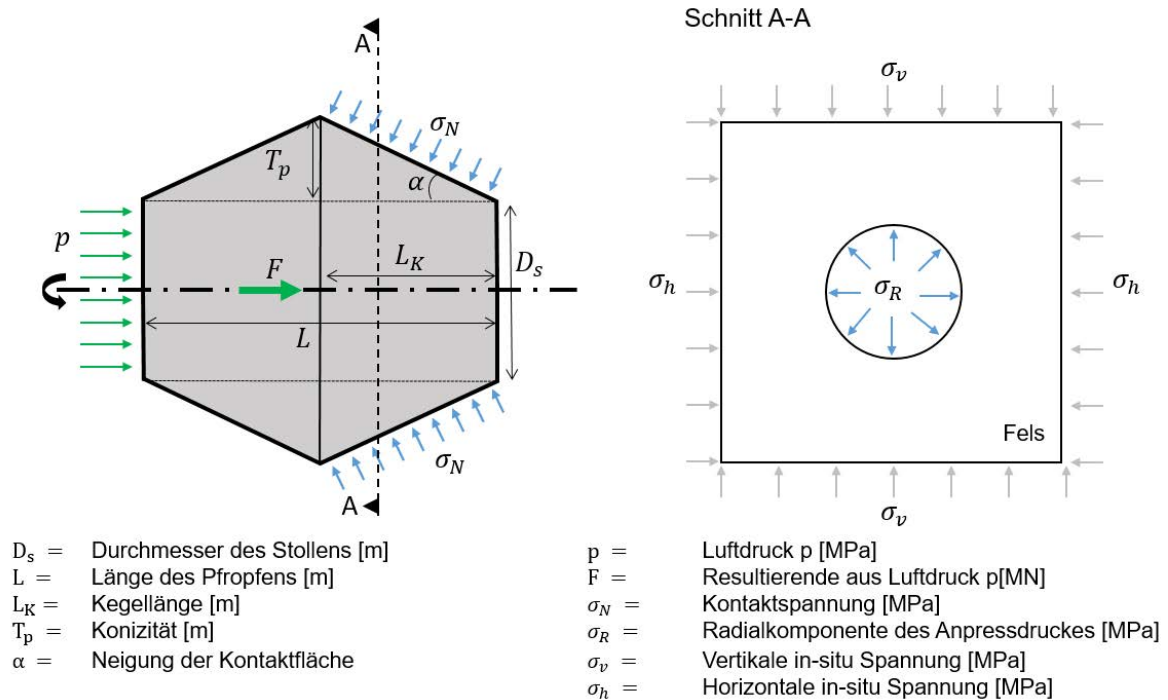


Abbildung 29: Modellierung des Betonpfropfens.

als symmetrisch und ohne die Durchdringungen von Leitungen und Zugang betrachtet. Die Konizität und die Länge des Betonpfropfens ( $T_p$  bzw.  $L$  in Abbildung 29) werden so dimensioniert, dass eine Überbeanspruchung im Beton oder eine Rissbildung im Fels im Widerlagerbereich ausgeschlossen werden können.

Aufgrund der unterschiedlichen Stollendurchmesser und Bemessungsluftdrücke werden alle drei Betonpfropfen bemessen, d.h. die jeweilige Länge  $L$  und Konizität  $T_p$  ermittelt. Für den Betonpfropfen wird ein Beton der Klasse C25/30 angenommen. Dieser verfügt über eine Druckfestigkeit von  $\sigma_{ck} = 25$  MPa und einer Schubspannungsgrenze von  $\tau_c = 1.5$  MPa (ohne Widerstandsbeiwert  $\gamma_c$  nach SIA 262). Aufgrund der angenommenen sehr guten geologischen Verhältnisse ist die Festigkeit des Felsens grösser als die des Betons. Daher ist letztere massgebend für die Nachweise bzgl. Beanspruchung durch Druckspannungen.

Eine Beanspruchung des Betons bis zur Mobilisierung seiner Druckfestigkeit würde aufgrund seines spröden Bruchverhaltens zur Rissbildung führen. Risse können zu Undichtigkeiten führen und es kann zu Spannungsumlagerungen kommen, was zu grossen bleibenden Verformungen führt. Letztere sind insbesondere im Bereich des Durchgangs des Betonpfropfens problematisch, da sie ein Verklemmen der Tür verursachen würden. Ferner sind die Auswirkungen einer zyklischen Belastung auf bereits gebrochenem Beton kaum zuverlässig quantifizierbar. Daher wird der Betonpfropfen so dimensioniert, dass die Festigkeit nicht mobilisiert wird (Bedingung 1). Massgebend hierbei ist die einaxiale Druckfestigkeit, weil – obwohl der Pfropfen weitestgehend mehrachsig auf Druck beansprucht wird – dieser an seinem drucklosen Ende atmosphärischem Druck ausgesetzt ist, d.h. an dieser Stelle entspricht der Spannungszustand einer einaxialen Druckbelastung. Ferner erzeugt der Anpressdruck des Betonpfropfens auf dem Felsen tangentielle Spannungen (analog zur gelochten Scheibe mit Innendruck; s. Abbildung 29 rechts). Wie bei der Dimensionierung der HDHR beschrieben (siehe Abschnitt 2.4.3.1) können Risse im Fels ausgeschlossen werden, falls keine Zugspannungen im Fels im Kontaktbereich Beton-Fels infolge Querkzug durch entsprechende Dimensionierung des Betonpfropfens zugelassen werden (Bedingung 2).



Gefährdungsbild: Betonversagen infolge Druckspannung: Sowohl der Betonpfropfen als auch der Fels werden als Starrkörper betrachtet (Abbildung 29). Die Einwirkung  $F$  errechnet sich als Resultierende des Luftdrucks auf die Querschnittsfläche des Stollens. Bei Vernachlässigung einer allfälligen Kohäsion zwischen Beton und Fels kann die Kontaktspannung im Wiederlagerbereich  $\sigma_N$  analog zur Fugenpressung in einer Kegelpressverbindung berechnet werden:

$$\sigma_N = \frac{F \cos \varphi_{BF} \cos \alpha}{(D_s + T_p) \pi L_K \sin(\varphi_{BF} + \alpha)}, \quad (4-12)$$

wobei  $\varphi_{BF}$  den Reibungswinkel zwischen Beton und Fels bezeichnet und die Bedeutung der weiteren geometrischen Grössen in Abbildung 29 beschrieben wird. Mit  $\tan \alpha = T_p / L_K$  erhalten wir:

$$\sigma_N = p \frac{1}{4 \left(1 + \frac{T_p}{D_s}\right) \frac{T_p}{D_s}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_K}{T_p} \tan \varphi_{BF}}. \quad (4-13)$$

Wird die Reibung zwischen Beton und Fels vernachlässigt ( $\varphi_{BF} = 0$ ), hängt die Kontaktspannung  $\sigma_N$  nur noch vom Luftdruck und vom Verhältnis zwischen Konizität und Stollendurchmesser ab:

$$\sigma_N = p \frac{1}{4 \left(1 + \frac{T_p}{D_s}\right) \frac{T_p}{D_s}}. \quad (4-14)$$

Die Auflösung nach  $T_p$  ergibt:

$$T_p = \frac{D_s}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{p}{\sigma_N}} - 1 \right) \quad (4-15)$$

Die Bedingung 1 (siehe oben) ist erfüllt, falls die Kontaktspannung  $\sigma_N$  kleiner ist als die einaxiale Druckfestigkeit des Betons  $f_{ck}$ , d.h. die Mindestkonizität wird durch das Einsetzen der maximal zulässigen Kontaktspannung in Gleichung 4-15 ermittelt. Spannungszustände, welche noch ungünstiger sind (Zug / Querzug), müssen in einem möglichen Folgeprojekt aufgrund konstruktiver Details geprüft werden.

Gefährdungsbild: Zugspannungen im Fels: Als Modell für die Untersuchung der obengenannten Bedingung 2 wird vereinfacht wiederum eine gelochte Scheibe betrachtet (Abbildung 29, links). Da alle Betonpfropfen horizontal ausgerichtet sind, ist eine der zu berücksichtigenden Hauptspannungen die Vertikalspannung  $\sigma_v$ . Ob diese die grösste oder kleinste Hauptspannung auf der betrachteten Ebene ist, hängt von der Ausrichtung und den entsprechenden Seitendruckbeiwerten ab. Die maximale interne Radialspannung  $\sigma_R$  infolge des Anpressdruckes  $\sigma_N$  errechnet sich gemäss Gleichungen 4-4 und 4-5 für  $\sigma_{\theta\theta} = 0$  (d.h. keine Zugspannungen) für eine horizontale Ausrichtung parallel zu  $\sigma_{hmax}$  zu:

$$3\sigma_{hmin} - \sigma_v - \sigma_R = (3K_{0,min} - 1) \cdot \gamma H - \sigma_R = 0, \quad (4-16)$$

bzw. für eine horizontale Ausrichtung parallel zu  $\sigma_{hmin}$  zu:

$$3\sigma_v - \sigma_{hmax} - \sigma_R = (3 - K_{0,max}) \cdot \gamma H - \sigma_R = 0. \quad (4-17)$$

Da die Radialspannung  $\sigma_R$  der Radialkomponente von  $\sigma_N$  entspricht, gilt  $\sigma_R \leq \sigma_N$ . Daher kann die Bedingung 2 konservativ und unabhängig von der Neigung der Kontaktfläche  $\alpha$  folgendermassen beschrieben werden:



$$\sigma_N \leq \min\left(\left(3K_{0,\min} - 1\right) \cdot \gamma H; \left(3 - K_{0,\max}\right) \cdot \gamma H\right). \quad (4-18)$$

Die Kombination der Bedingungen 1 und 2 führt zu:

$$\sigma_N \leq \min\left(f_{ck}; \left(3K_{0,\min} - 1\right) \cdot \gamma H; \left(3 - K_{0,\max}\right) \cdot \gamma H\right). \quad (4-19)$$

Die fallweise für die Betonpfropfen der Schacht- oder Kavernenvariante zu berücksichtigende Überlagerung  $H$  ergibt sich aus der Mindestüberlagerung der HDHR (Tabelle 11) und nur für die Betonpfropfen im unteren Zugangsstollen zuzüglich der Höhe des HDHR. Die minimale Konizität errechnet sich durch einsetzen der Gleichung 4-19 in Gleichung 4-15. Aus konstruktiven Gründen wurde für alle Betonpfropfen eine minimale Konizität von 0.5 m berücksichtigt. In Tabelle 13 wird die minimale Konizität für die jeweiligen Betonpfropfen aufgelistet.

Tabelle 13: Abmessungen und Bemessungsluftdruck der Betonpfropfen.  
\*Rechnerisch sind geringere Abmessungen möglich.

Ort	Stollen-Durchmesser $D_s$ [m]	Bemessungs-luftdruck $p$ [MPa]	Schacht		Kaverne	
			Konizität $T_p$ [m]	Länge $L$ [m]	Konizität $T_p$ [m]	Länge $L$ [m]
HDHR (unten)	7.5	10	1.6	12.5	0.9	12.5
NDHR (unten)	7.5	1	0.5*	3.0*	0.5*	3.0*
HDHR (oben)	5	10	0.8	8.5	-	-

Gefährdungsbild: Abscheren im Beton: Im betrachteten Modell zur Bemessung der Länge des Betonpfropfens wird angenommen, dass der Widerstand aus der Mobilisierung einer gleichmässigen Schubspannung entlang der Mantelfläche eines Zylinders mit Abmessungen entsprechend des Stollendurchmessers und der Länge des Betonpfropfens besteht ( $D_s$  und  $L$  in Abbildung 29). Hierbei wird nur die Schubspannungsgrenze des Betons ( $\tau_c = 1.5$  MPa) angesetzt, d.h. positive Effekte infolge einer Querverspannung oder einer allfälligen Bewehrung des Betonpfropfens werden vernachlässigt. Die erforderliche Länge  $L$  für die jeweiligen Betonpfropfen errechnet sich demnach zu:

$$L \geq \frac{F}{D\pi\tau_c} = \frac{pD}{4\tau_c} \quad (4-20)$$

Aus Konstruktionsgründen (Konizität, sauberes Einbinden des Betonpfropfens, Dichtigkeit der Durchführungen von Leitungen usw.) wird die minimale Länge des Betonpfropfens zu 3 m gesetzt. In Tabelle 13 werden die Längen der jeweiligen Pfpfen aufgelistet.

Weiterführende Untersuchungen: Unter Umständen weicht das tatsächliche Verhalten des Betonpfropfens und des Felsens im Widerlagerbereich von den Annahmen ab. Zum einen ist die Vernachlässigung der Reibung für die Bemessung der Konizität sehr konservativ. Bei  $L_k/T_p > 6$  und  $\tan \varphi_{FB} > 0.5$  ergibt die Vernachlässigung der Reibung eine um Faktor 4 höhere Kontaktnormalspannung. Weiter können Verformungen im Widerlagerbereich eine klaffende Fuge zwischen Betonpfropfen und Fels auf der Luftdruckseite verursachen. Eine geeignete Wahl des Winkels  $\alpha$  kann diese verkleinern. Eventuell muss durch eine entsprechende konstruktive Massnahme die Integrität der Membrane gewährleistet werden. Ebenfalls muss basierend auf der gewählten Geometrie des Betonpfropfens, einschliesslich des erforderlichen Zugangs und der Leitungsdurchführungen (z.B. für Druckluft, für Temperatur- und Druckmessung sowie Strom für die Regelung der Wärmespeicherklappen) geprüft werden, ob Zugspannungen



im Beton entstehen. Die Länge des Betonpfropfens kann mit einem weniger konservativen, aber realistischen räumlichen Modell ebenfalls reduziert werden. Hierzu müsste in einer nächsten Projektphase die Form des Betonpfropfens unter Berücksichtigung des Spannungsdehnungsverhalten der Materialien mittels einer detaillierteren numerischen Modellierung angepasst werden.

#### 2.4.4 Selektion von potentiellen Standorten

##### 2.4.4.1. Variantenanalyse

Basierend auf den Ergebnissen der Gebietseingrenzung erfolgt die Auswahl konkreter Standorte. Hierbei werden folgende Kriterien zusätzlich beachtet:

- a) Lage des Zugangsbereiches: Bevorzugt wird ein Zugang an einem steilen Hang um die Länge des Zugangsstollens bis zum Erreichen der erforderlichen Überlagerung möglichst klein zu halten. Im Portalbereich ist es von Vorteil, eine ausreichend grosse Fläche in relativ flachem Gelände für die Installationen des Vortriebs verfügbar zu haben, um den Aufwand für Erdarbeiten und allfällige Stützbauwerke zu vermeiden. Ferner wäre vorteilhaft, falls sich der Zugang möglichst nahe an bestehender Transportinfrastruktur (Strassen, Schienen) befinden würde, so dass diese als Transport- und Schutterungswege verwendet werden könnten. Bei der Schachtvariante ist noch zu berücksichtigen, dass zusätzlich noch einen Zugang zum Schachtkopf erforderlich ist. Hierbei beträgt der erforderliche Höhenunterschied zwischen beide Zugänge ca. 270 m.
- b) Umweltaspekte: Die Zugänge und Installationsplätze sollten sich nicht in einem Natur- oder Landschaftsschutzgebiet liegen. Weiter sollten Standorte ausgeschlossen werden, die sich in Grundwasserschutzgebieten der Schutzzonen S1-S3 nach [30] befinden. In beiden Fällen ist mit strengeren Anforderungen für eine Bewilligung zu rechnen. Dagegen kommen die Schutzbereiche Au, welche zum allgemeinen flächendeckenden Schutz des Grundwassers dienen, als Standorte in Frage. In diesen Bereichen ist zwar mit einigen Einschränkungen zu rechnen, die Kostenfolgen für ein Projekt sind jedoch als vertretbar einzuschätzen. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere der Portalbereich (wegen des potentiellen Kontakts zu den Schutzzonen) diesbezüglich kritisch ist, denn die tiefer liegenden Kavernen und Luftspeicher befinden sich im gering durchlässigen Fels und werden bei einer Beurteilung bezüglich oberflächennahen Schutzzonen ausgenommen.
- c) Bebauungen und Geologie: Generell sollten Portalstandorte im Lockergestein, aber insbesondere in Schuttkegeln vermieden werden. Die Durchörterung eines Schuttkegels ist mit hohem Aufwand und Kosten verbunden. Ist nur eine geringe Lockergesteinsschicht auf der Felsoberfläche vorhanden, kann diese abgetragen werden. Im Falle von Portalstandorten in Lockergestein und unmittelbar talseitig von Bebauungen stellen unzulässige Geländesetzungen ein zusätzliches Gefährdungsbild dar, dessen Beherrschung die Durchführung zusätzlicher Bauhilfsmassnahmen mit höheren Kosten erforderlich macht. Ebenfalls können bei nahegelegenen Siedlungen Einschränkungen betreffend Lärm- und Erschütterungsemissionen entstehen, welche negative Kostenfolgen haben können.

Mit Hilfe des Online-GIS [map.geoadmin.ch](http://map.geoadmin.ch) erfolgte die Suche und Auswahl konkreter Standorte. Es wurden vier Standorte ausgesucht, jeweils einer nördlich und südlich des Grimselpasses für die vertikale oder horizontale Anordnung der TES (Schacht oder Kaverne). Weitere potentielle Standorte sind vorhanden (Abbildung 26). In einem möglichen Folgeprojekt sollten Aspekte wie Eigentumsverhältnisse des Baugrunds, Bewilligungsfähigkeit oder Einspruchswahrscheinlichkeiten von Interessensgruppen für die jeweiligen Standorte geprüft werden.



Unter Verwendung der Landeskarte und in Kombination mit dem Luftbild wurden zunächst mögliche Standorte für die Portale ausgewählt. Dazu wurden die oben erwähnten Kriterien a) bis c) optisch geprüft. Für die Schachtvariante wurde zusätzlich darauf geachtet, dass sowohl ein unterer, wie auch ein oberer Zugang möglich sind. Anschliessend wurde die Höhenkurve markiert, ab welcher die erforderliche Überlagerung für den HDHR (Schacht oder die Kaverne) erreicht wird. Dabei wird von einem steigenden Vortrieb mit ca. 1% Neigung ausgegangen, was eine einfachere Wasserhaltung in Bau- und Betrieb erlaubt. Die Linienführung wird als die kürzeste Strecke zwischen Portal und Mindestüberlagerung gewählt.

Für die Schachtvariante wird ein möglichst kurzer oberer Zugangsstollen gewählt um die oben anfallende Schuttermenge gering zu halten. Dabei sollte das Längsgefälle jedoch 15% nicht überschreiten. Die genaue Lage des DLSKW sollte in einem weiteren Planungsschritt abhängig von den Ergebnissen aus geologisch-geotechnischen Erkundungen definiert werden. Da die Anforderungen bezüglich Schuttermengen und Wartung während der Nutzung (siehe Abschnitt 2.4.1.3) moderat sind, kann das obere Portal auch an relativ enge, steile Bergstrassen anbinden. In einem Kartenausschnitt ist die Lage der ausgewählten Standorte für die Schacht- und Kavernenvariante (S und K in Abbildung 30) in den Gebieten nördlich und südlich des Grimselpasses dargestellt. In den Beilagen 1 bis 6 werden in einem grösseren Massstab neben der Geologie, Topographie, Verkehrswege und Siedlungen, die Lage der Portale und der HDHR für die Schacht- und Kaverne- und Kaverne/Tunnelvariante und die Standorte nördlich und südlich des Grimselpasses dargestellt. Die HDHR nördlich (siehe Anhang 5.3 - 5.5) und südlich (siehe Anhang 5.6 - 5.8) des Grimselpasses befinden sich im Aare-Granit bzw. im Gärsthorn-Gneiskomplex. Für die Varianten Kaverne und Kaverne/Tunnel ist das gleiche Portal und Kavernenzugang vorgesehen. Nachfolgend werden wesentliche Merkmale dieser potentiellen Standorte näher erläutert.

Die Standorte Nord haben den Vorteil, dass sie an bestehende Infrastruktur der KWO anbinden können. Es ist jedoch noch abzuklären, ob eine Deponie oder Verwertungsanlage (z.B. Betonzuschlagstoffe) für die Materialbewirtschaftung in der Nähe verfügbar ist. Ist dies nicht der Fall, so müsste das Ausbruchmaterial von etwa insgesamt 400'000 m<sup>3</sup> mittels LKWs durch Ortschaften in Richtung Interlaken befördert werden. Bei LKWs mit einer Nutzlast von 20 t und einer Dichte des Schuttmaterials von 1.4 t/m<sup>3</sup> würden dies etwa 28'000 LKW-Fahrten in jede Richtung während der Bauzeit erfordern. Bei den Standorten Süd könnte man zwar keine vorhandene unterirdische Infrastruktur nutzen und auf weniger detaillierte Aufschlüsse bzw. Erkundungsergebnisse zurückgreifen, man hätte aber den potentiellen Vorteil einer Materialbewirtschaftung bei örtlichen Kieswerken oder die Anbindung an der Eisenbahnlinie.

Die Variante «Schacht-Nord» (Anhang 5.3) ist über die Grimselstrasse erreichbar. Im Winter muss jedoch damit gerechnet werden, dass diese ab Guttannen geschlossen ist. Dabei kann jedoch, falls eine Zusammenarbeit mit den KWO möglich ist, deren Stollen- oder Seilbahnsystem für den Winterzugang gegebenenfalls genutzt werden. Das untere Portal befindet sich im Hangschutt, während das obere Portal direkt im Fels liegt.

Das Portal der Varianten «Kaverne-Nord» und «Kaverne/Tunnel-Nord» (Anhang 5.4 - 5.5) befinden sich im gemischten Schutt in der Nähe des Kraftwerks Hangholz, so dass die dort bestehende Infrastruktur für die Zufahrt genutzt werden kann, vorbehaltlich des Einverständnisses des Eigentümers. Aufgrund der Länge des HDHR-Tunnels ist zu erwarten, dass mehrere Zonen mit geschwächtem Gestein angetroffen werden. Diese stellen zwar grundsätzlich kein unüberwindbares technisches Problem dar, müssen aber in einem möglichen Folgeprojekt gesondert untersucht werden.

Bei der Variante «Schacht Süd» (Anhang 5.6) befinden sich das untere Portal im Gneis und das obere Portal in Moränenmaterial. Oberhalb des Schachts befindet sich eine Grundwasserschutzzone. Da





diese nur oberflächlich relevant ist, dürfte dies keine Auswirkungen haben auf die sich ca. 300 m unterhalb der Oberfläche befindenden Hohlräume des DLSKW. Die Zufahrt zum oberen Zugangsstollen kann über die Grimselstrasse erfolgen. Diese ist bis Gletsch auch im Winter geöffnet. Aufgrund der topographischen Gegebenheiten, d.h. Nähe des oberen Portals zur Grimselstrasse, wird der Zugangsstollen mit der maximalen Steigung von 15% ausgeführt.

Das Portal der Varianten «Kaverne-Süd» und «Kaverne/Tunnel-Süd» (Anhang 5.7 - 5.8) befindet sich im Moränenmaterial. Auch in diesem Fall muss beim Bau eines Tunnels mit mehreren Zonen mit geschwächtem Gestein gerechnet werden.

#### 2.4.4.2. Kostenschätzung Hohlraumherstellung

Die Abmessungen der DLSKW Komponenten für alle sechs Varianten (Anhang 5.3 - 5.8) wurden in Abschnitt 2.4.1 diskutiert. Je nach Variante und Standort variiert die Anzahl und Länge der Zugangsstollen. Die Einheitspreise pro m<sup>3</sup> Ausbruch (Richtkosten) für die Schätzung der Rohbaukosten der jeweiligen DLSKW-Komponenten basieren auf Erfahrungswerten (Tabelle 14): Diese stammen aus ähnlichen Bauwerken, die in letzter Zeit ausgeführt wurden und sind weder standort- (Geologie) noch projektbezogen (Layout, Bauabwicklung usw.). Ihre Genauigkeit beträgt  $\pm 20\%$ . Ferner beinhalten diese

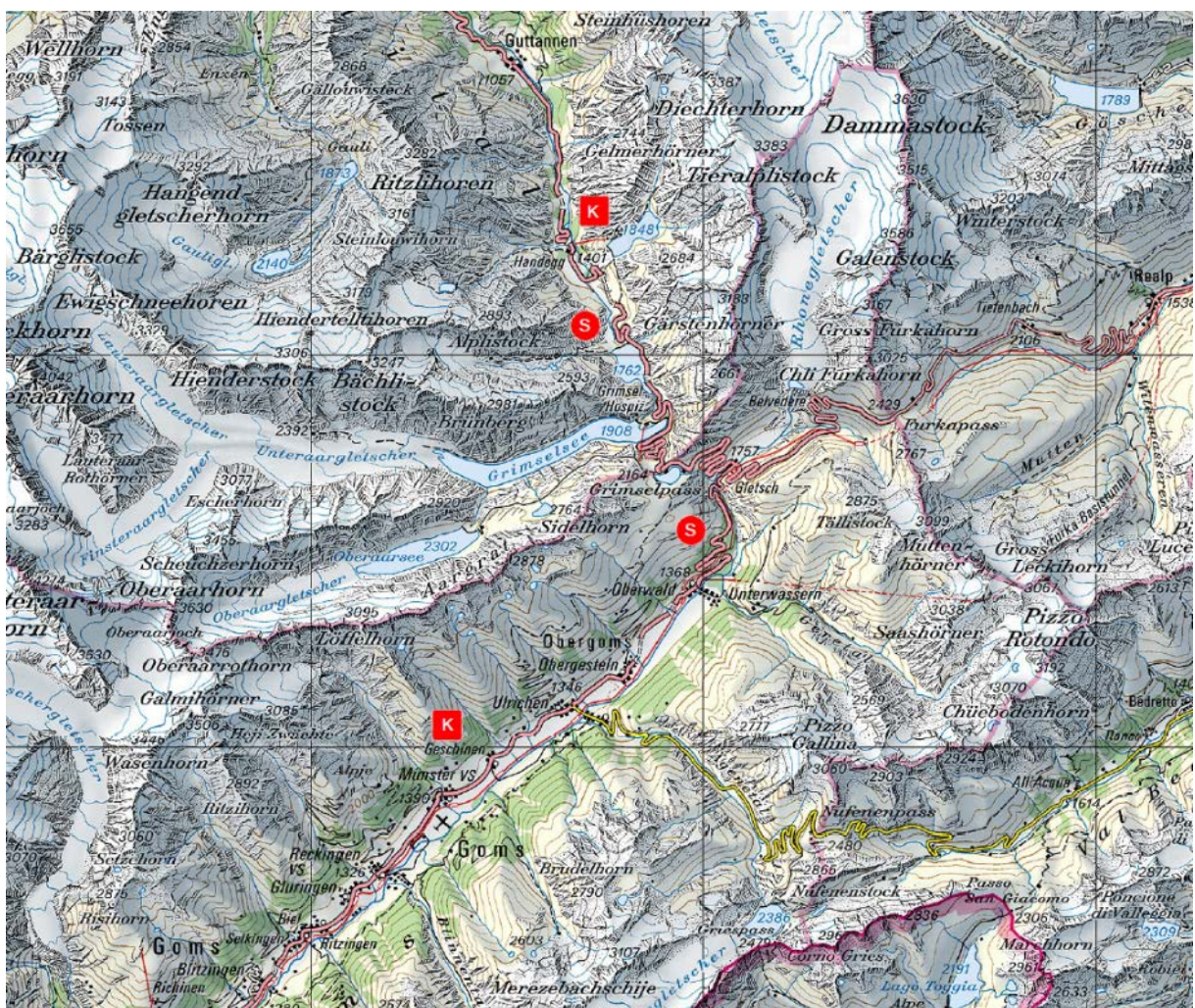


Abbildung 30: Potentielle Standorte für HDHR-Kaverne (K) und HDHR-Schacht (S) [22].





Erfahrungswerte weder Wasserhaltungsmassnahmen noch Installationskosten. Bei den vorgeschlagenen Standorten kann jedoch von geringen Mengen Bergwasser ausgegangen werden. Die Installationskosten werden mit 25% der Rohbaukosten geschätzt. Die Abteufung des Schachtes kann grundsätzlich von oben nach unten als Blindschacht oder über einen oberen Zugangsstollen mittels Raiseboringverfahren und anschliessender Aufweitung von oben nach unten erfolgen. Aufgrund der hohen Kosten pro Kubikmeter Ausbruch wird die Blind-Schacht Alternative nicht weiterverfolgt. Bei der «Kaverne/Tunnel» Variante kann maschinell oder konventionell vorgetrieben werden. Sollte man sich für einen maschinellen Vortrieb entscheiden, dann würde der Zugangsstollen mit der gleichen TBM aufgeföhren. In der jetzigen Projektphase ist unklar, welche Vortriebsart wirtschaftlicher ist, da die Gesamtlänge der aufzuföhrenden Strecke (ca. 3 km) im Grenzbereich der Wirtschaftlichkeit eines TBM-Vortriebes liegt.

Tabelle 14: Geschätzte Rohbaukosten pro m<sup>3</sup> für die Hohlraumherstellung.

Hohlraum	ca. Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Querschnitt [m <sup>2</sup> ]	Kosten [CHF/m <sup>3</sup> ]
Zugangsstollen oben	500	5	5	25	170
Zugangsstollen unten	1'000	10	10	79	180
Maschinenkaverne	150	20	24	458	140
Niederdruckkaverne	100	27	25	663	140
Hochdruckkaverne	100	31	31	750	150
Hochdrucktunnel	1'680	10	10	79	180
Hochdruckschacht (Blind-Schacht)	275	30	30	707	225
Hochdruckschacht (Raisebore)	275	30	30	707	130

Die Abmessungen und die sich daraus ergebenden Kubaturen sowie die Gesamtkosten für den Rohbau für jede Variante werden in Angang 5.3 - 5.8 aufgelistet und in Tabelle 15 zusammengefasst. Demnach variieren die Kosten je nach Variante zwischen 69 und 95 MCHF. Bei der Schachtlösung sind durch die grössere erforderliche Überlagerung längere Zugänge erforderlich, welche sich negativ auf die Kosten auswirken. Allerdings können nach der genaueren Bestimmung der Standorte die örtlichen topographischen Gegebenheiten die Länge der Zugangsstollen und somit die Rohbaukosten beeinflussen. Da der Unterschied zwischen den Varianten etwa die Hälfte der Genauigkeit der Richtkosten beträgt, können in der jetzigen Projektphase aufgrund der Rohbaukosten alleine keine der untersuchten Varianten ausgeschlossen werden.

Tabelle 15: Geschätzte Rohbaukosten für die Hohlraumherstellung.

Variante	Lage	Hohlräume		Zugänge		Total (mit Aufschlag)	
		Volumen [m <sup>3</sup> ]	Kosten [MCHF]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Kosten [MCHF]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Kosten [MCHF]
Schacht	Nord	329'374	55	116'748	26	446'121	81
	Süd	329'374	55	178'872	40	508'245	95
Kaverne	Nord	329'963	60	39'270	9	369'233	69
	Süd	329'963	60	43'982	10	373'945	70
Kaverne/ Tunnel	Nord	330'676	65	39'270	9	369'946	74
	Süd	330'676	65	43'982	10	374'659	75



Zur Abschätzung der Gesamtkosten eines DLSKWs müssen zu den Rohbaukosten unter anderem noch die Kosten für einen allfälligen Landerwerb, die Materialbewirtschaftung, den Innenausbau, der Membrane und ihre Schutzschichten, ihre Anbringung und die Kraftwerkskomponenten berücksichtigt werden. In weiteren Projektphasen sind die Kosten für Erkundungen und Untersuchungen noch einzuplanen.



### 3 Weiteres Vorgehen

Basierend auf den in diesem Projekt erarbeiteten Resultate und Schlussfolgerungen werden folgende weitere Schritte vorgeschlagen:

1. Die Verträglichkeit der Materialien der in Abschnitt 2.3.2 vorgeschlagenen Abdichtungssysteme, insbesondere des favorisierten vollverklebten Systems, sollte näher untersucht werden.
2. Basierend auf den Resultaten der Materialverträglichkeit sollten zwei Untersuchungen fortgeführt werden:
  - a. Die Abdichtungssysteme sollten in einem kleinen, speziell für Dichtheitsuntersuchungen konstruierten Hohlraum, genau untersucht werden. Dieser Hohlraum sollte so konstruiert sein, dass die grundlegenden Probleme bei der Anbringung der Abdichtungssysteme an den realen Hohlräumen, insbesondere am Betonpropfen (siehe Abschnitt 2.3.2.3), reproduziert werden können. Um den Versuchsablauf zu beschleunigen, sollte der Hohlraum so klein wie möglich sein (z.B. rund 2-3 m Länge und 2-3 m Durchmesser), damit er rasch be- und entladen werden kann. Auf den Bau eines Wärmespeichers im Hohlraum sollte aus Kostengründen verzichtet werden, d.h. es sollte ein Kompressor mit entsprechender Kühlung (wie z.B. in der Pilotanlage bei Biasca, siehe [1]) eingesetzt werden.
  - b. Um ein besseres Verständnis der Bildung von Undichtheiten wie z.B. Rissen in Abdichtungssystemen und deren Evolution unter Druckschwankungen aufzubauen, sollten Laboruntersuchungen durchgeführt werden. Mit einem besseren Verständnis wird man die in Abschnitt 2.3.5 vorgeschlagenen Methoden zur Ortung von Leckagen besser evaluieren und allenfalls weiterentwickeln können.
3. Falls die Untersuchungen der Abdichtungssysteme erfolgreich sind, sollte mit der Planung einer DLSKW-Demonstrationsanlage begonnen werden. Um die Kosten zu minimieren, sollten kommerziell verfügbare Kompressoren und Turbinen mit einer Leistung von rund 5-10 MW zum Einsatz kommen. Das Kavernenvolumen sollte so gewählt werden, dass Lade- und Entladedauern von rund 30 Minuten bis 1 Stunde erreicht werden, womit sowohl das transiente Verhalten (siehe [31]) wie auch das quasi-stationäre Verhalten der Anlage untersucht werden könnte. Falls bestehende Kavernen, z.B. ausgemusterte Kavernen der Armee, von ausreichenden Volumina zur Verfügung stehen und aus geomechanischer Sicht geeignet sind, sollte deren Benutzung für die Demonstrationsanlage in Betracht gezogen werden, um die Kosten zu minimieren. In der Demonstrationsanlage könnten auch die unter Schritt 2b evaluierten und allenfalls weiterentwickelten Methoden zur Ortung von Leckagen erprobt werden.



## 4 Literaturverzeichnis

- [1] G. Zanganeh, «Demonstration of the Ability of Caverns for Compressed Air Storage with Thermal Energy Recuperation,» Swiss Federal Office of Energy, Berne, 2016.
- [2] Schweizerischer Nationalfonds. [Online]. Available: <https://www.nfp-energie.ch/en/projects/umbrella/109/>. [Zugriff am November 2019].
- [3] Schweizerischer Nationalfonds. [Online]. Available: <https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1010/>. [Zugriff am November 2019].
- [4] Schweizerischer Nationalfonds. [Online]. Available: <https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1011/>. [Zugriff am November 2019].
- [5] Schweizerischer Nationalfonds. [Online]. Available: <https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1012/>. [Zugriff am November 2019].
- [6] L. Geissbühler, V. Becattini, G. Zanganeh, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Haselbacher and A. Steinfeld, "Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 129-139, 2018.
- [7] V. Becattini, L. Geissbühler, G. Zanganeh, A. Haselbacher und A. Steinfeld, «Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 2: Tests with combined sensible/latent thermal-energy storage,» *Journal of Energy Storage*, Bd. 17, pp. 140-152, 2018.
- [8] T. Ishihata, «Underground Compressed Air Storage Facility for CAES-G/T Power Plant Utilizing an Airtight Lining,» *Journal of the International Society of Rock Mechanics*, Bd. 5, pp. 17-21, 1997.
- [9] F. Terashita, S. Takagi, S. Kohjiya und Y. Naito, «Airtight Butyl Rubber Under High Pressures in the Storage Tank of CAES-G/T System Power Plant,» *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 95, pp. 173-177, 2005.
- [10] J. Rutqvist, H.-K. Kim, D.-W. Ryu, J.-H. Synn und W.-K. Song, «Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns,» *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Bd. 52, pp. 71-81, 2012.
- [11] S. Zhou, C. Xia und Y. Zhou, «Long-term stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage: thermo-mechanical damage modeling,» *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018.
- [12] Y. Zhou, X. C., P. Zhang und S. Zhou, «Air Leakage from an Underground Lined Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage Through a Rubber Seal,» in *13th International Congress of Rock Mechanics*, Montreal, 2015.
- [13] D. Wu, J. Wang, B. Hu und S.-Q. Yang, «A coupled thermo-hydro-mechanical model for evaluating air leakage from an unlined compressed air energy storage cavern,» *Renewable Energy*, Bd. 146, pp. 907-920, 2019.
- [14] P. Roos, *Sensible Thermal-Energy Storage for Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage Plants: Design and Optimization*, PhD Dissertation, ETH Zurich, 2020.
- [15] A. Haselbacher und P. Roos, «Simple Models of Diabatic and Adiabatic Compressed Air Energy Storage Plants,» Technical Report, Energy Science Center, ETH Zurich, 2020.



- [16] S. V. Patankar, «A Numerical Method for Conduction in Composite Materials, Flow in Irregular Geometries and Conjugate Heat Transfer,» in *Sixth International Heat Transfer Conference*, 1972.
- [17] H. Schmiedel, *Handbuch der Kunststoffprüfung*, München: Hanser, 1992.
- [18] G. Menges, *Werkstoffkunde der Kunststoffe*, Wien, 1979.
- [19] H. Dominghaus, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Düsseldorf, 1992.
- [20] R. B. Brown, *Handbook of plastic test methods*, Harlow: Longman Scientific & Technical, 1988.
- [21] Bundesamt für Landestopografie, «Geologische Karte der Schweiz 1:50'000,» 2005.
- [22] Bundesamt für Landestopografie, «Landeskarte,» [Online]. Available: <https://map.geo.admin.ch>. [Zugriff am Oktober 2019].
- [23] Bundesamt für Landestopografie, «Blatteinteilung Landeskarte 1:500'000 Swiss Map Vector,» 2016.
- [24] Bundesamt für Landestopografie, «Statistik der Wasserkraftanlagen (WASTA),» 2016.
- [25] Grimsel Test Site, «Nagra Technical Reports (NTBS),» [Online]. Available: <https://www.grimsel.com/media-and-downloads/70-grimsel-documentation>. [Zugriff am 22 7 2020].
- [26] Kraftwerke Oberhasli AG, «Ersatz Staumauer Spitalamm,» [Online]. Available: <https://www.grimselstrom.ch/ausbauvorhaben/zukunft/ersatz-staumauer-spitalamm>. [Zugriff am 22 7 2020].
- [27] NAGRA, «Technischer Bericht 87-14, Felslabor Grimsel, Geologie (S. 45),» Baden, Schweiz, 1989.
- [28] P. von Soos und J. Engel, *Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor. Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen*, K. Witt, Hrsg., Berlin: Ernst und Sohn, 8. Auflage, 2017, p. 212.
- [29] H. Krietsch, V. Gischig, M. Jalali, F. Amann, K. Evans, J. Doetsch und B. Valley, «Stress measurements in crystalline rock: Comparison of overcoring, hydraulic fracturing and induced seismicity results,» in *51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, USA, 2017.
- [30] Gewässerschutzverordnung (GSchV) der Schweiz, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19983281/index.html>, Stand 01.04.2020.
- [31] M. Barbato, D. Montorfano, F. Contestabile, J. Roncolato, A. Haselbacher, G. Zanganeh, P. Jenny, E. Jacquemoud und M. Scholtysik, «AA-CAES-G2G: Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage grid-to-grid performance modeling,» Swiss Federal Office of Energy, Berne, Switzerland, 2019.
- [32] F. Amberg, G. Anagnostou, Y. Boissonnas, A. Brauchart, A. Haselbacher, M. Lonschien, E. Pimentel und G. Zanganeh, «AASD – Abdichtung und Auslegung von Speicherhöhlräumen für Druckluftspeicherkraftwerke, Zwischenbericht vom 22. November 2019,» Bundesamt für Energie, 2019.
- [33] Mecadi GmbH, *Interne Prüfmethodebeschreibung*, Bexbach, Deutschland, 2020.



## **5 Anhang**

### **5.1 Produktdatenblätter**



# SikaPlan® WP 1100-20 HL

(vorm. SikaPlan®-14.6 V Tunnel gelb/schwarz)  
Kunststoff-Dichtungsbahn (PVC-P)

## Beschreibung

SikaPlan® WP 1100-20 HL ist eine homogene Kunststoff-Dichtungsbahn auf PVC-P Basis mit einer Signalschicht.

## Anwendung

- Abdichtung für den Tunnelbau
- Abdichtung für den Tief- und Ingenieurbau.

## Vorteile

- hohe Beständigkeit gegen Alterung
- hohe Festigkeit und Dehnung
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung
- hohe Dimensionsstabilität
- resistent gegen Wurzeln und Mikroorganismen
- resistent gegen alle natürlichen, in Grundwasser und Boden vorkommende, aggressiven Stoffe
- einsetzbar bei Wasser mit niedrigem pH-Wert
- hohe Wasserdampfdurchlässigkeit
- mit Heißluft verschweißbar
- kann auf feuchtem Untergrund verlegt werden

## Atteste

### Prüfzeugnisse

- Produkt Deklaration EN 13491 - Geosynthetische Dichtungsbahnen - Eigenschaften, die für die Anwendung bei Bau von Tunneln und Tiefbauwerken erforderlich sind.
- CE-Zulassung No. 1349-CPD
- Brandprüfung gem. SIA V280-12, Klasse 4.1



## Produktdaten

### Art

<b>Form / Farbe</b>	Oberfläche Farbe	glatt Oberschicht gelb (Signalschicht) Unterschicht dunkelgrau
---------------------	---------------------	--

<b>Lieferform</b>	Rollenabmessung Gewicht	2,2 m x Rollenlänge auf Anfrage 2,6 kg / m <sup>2</sup>
-------------------	----------------------------	--

### Lagerung

<b>Lagerung</b>	Rollen in Originalverpackung liegend, geschützt gegen Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee und Eis. Bei korrekter Lagerung unbeschränkt verarbeitbar.	
-----------------	--	--

### Technische Daten

<b>Produkt Deklaration</b>	gemäß EN 13491 (2006)	1349-CPD
----------------------------	-----------------------	----------

<b>Dicke</b>	2,0 (-5 / +10 %) mm	EN 1849-2
--------------	---------------------	-----------

<b>Flächengewicht</b>	2,6 (-5 / +10 %) kg/m <sup>2</sup>	EN 1849-2
-----------------------	------------------------------------	-----------

<b>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</b>	190 x 10 <sup>-6</sup> (± 50 x 10 <sup>-6</sup> ) 1/K	ASTM D 696-91
---	---	---------------

### Mechanische / physikalische Eigenschaften

<b>Wasserdichtigkeit</b>	< 10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> x m <sup>-2</sup> x d <sup>-1</sup>	prEN 14150:2001
--------------------------	---	-----------------

<b>Brandverhalten</b>	Klasse E	EN ISO 11925-2
-----------------------	----------	----------------

<b>Langzeitdruckfestigkeit</b>	dicht bei 7 N / mm <sup>2</sup> (50 h) nicht relevant für CE Kennzeichnung	SIA V280-14
--------------------------------	---	-------------

<b>Zugfestigkeit</b>	längs und quer	> 17,0 (± 2,0) N / mm <sup>2</sup>	ISO 527-1/3/5
----------------------	----------------	------------------------------------	---------------

<b>Weiterreissfestigkeit</b>	längs und quer	≥ 42 kN / m	ISO 34 Methode B; V = 50 mm/min
------------------------------	----------------	-------------	---------------------------------

<b>Berstdruckfestigkeit</b>	≥ 50 %	prEN 14151 D = 1,0 mm
-----------------------------	--------	-----------------------

<b>Stempeldurchdrückkraft</b>	> 2,35 (± 0,25) kN	EN ISO 12236
-------------------------------	--------------------	--------------

<b>E-Modul</b>	E <sub>1-2</sub> längs und quer nicht CE relevant	≤ 20 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527 - 1/3
----------------	---	------------------------	---------------

# Roofing

<b>Schlagfestigkeit</b>	(500 g) dicht bei 750 mm Fallhöhe nicht CE relevant	EN 1107-2 (SIA V280-4; DIN 16726-5.12)
<b>Verhalten beim Falzen in der Kälte</b>	≤ -20 °C	EN 495-5
<b>Thermische Alterung</b>	70 d / 70 °C Gewichtsveränderung Veränderung der Zugfestigkeit Veränderung der Reißdehnung nicht CE relevant	≤ 2 % ≤ 20 % ≤ 20 % EN 1296 (SIA280-8)
<b>Maßänderung nach Warmlagerung</b>	6 h / 80°C längs und quer Verhalten nach Hitzeeinwirkung: keine Blasen nicht CE relevant	≤ 2,0 % EN 1107-2 (SIA V280-4; DIN 16727-5.13)
<b>Reißdehnung</b>	längs quer	≥ 300 % ≥ 280 % ISO 527-1/3/5
<b>Beständigkeit</b>		
<b>Chemische Beständigkeit</b>	A (Säurehydrolyse) Veränderung der Zugdehnung  B (Alkalihydrolyse) Veränderung der Zugdehnung  D (künstliches Abwasser) Veränderung der Zugdehnung	EN 14414: 2004-2008; ISO 527 - 3/5 ≤ 10 %  ≤ 10 %  ≤ 10 %
<b>Künstliche Bewitterung</b>	verbleibende Reißfestigkeit und Zugdehnung: ≥ 75 %	EN 12224, 350 MJ/m2; ISO 527 - 3/5/100
<b>Verhalten nach Lagerung in Warmwasser</b>	8 Monate / 50 °C Gewichtsveränderung Veränderung der Zugfestigkeit Veränderung der Reißdehnung nicht CE relevant	≤ 4 % ≤ 20 % ≤ 20 % EN 1296 (SIA V280-13)
<b>Verhalten nach Lagerung in wässrigen Lösungen</b>	( 28 d / 23 °C), H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (5 %), Ca(OH) <sub>2</sub> (sat.); NaCl (10 %)  Veränderung der Zugfestigkeit Veränderung der Reißdehnung nicht CE relevant	≤ 15 % ≤ 15 % EN 1847 (SIA V280-18; DIN 16726-5.18)
<b>Verhalten bei hygrostatischem Druck</b>	5 bar / 72 h ( 10 bar / 24 h) kein Leck nicht CE relevant	EN 1928 (DIN 16726-5.11)
<b>Einfluss durch Mikroorganismen</b>	Veränderung der Zugfestigkeit Veränderung der Reißdehnung	≤ 15 % ≤ 15 % EN 12225; ISO 527 - 3/5

<b>Oxidationsbeständigkeit</b>	Veränderung der Zugfestigkeit Veränderung der Reißdehnung	≤ 25 % ≤ 25 %	pr EN 14575; ISO 527 - 3/5
<b>Wurzelbeständigkeit</b>	bestanden	prEN 14416:2002	
<b>umgebungsbedingte Spannungsrisssbildung</b>	Diese Prüfmethode kommt nur bei Abdichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen (FPO) zur Anwendung. ASTM D 5397-99 (EN 14576)		
<b>Schweißverhalten</b>	Scherversuch Schweißnaht Kurzzeit Schweißfaktor Schälbeständigkeit nicht CE relevant	Bruch ausserhalb der  fz ≥ 0,6 ≥ 0,6 N / mm	EN 12317-2 EN 12316-2
<b>Systemdaten</b>			
<b>Systembestandteile</b>	Zubehör: - Sikaplan® WP Rondelle - Sikaplan® W Felt PP - Sikaplan® W Tundrain A - Sikaplan® WP Schutzbahnen - Sika® Fugenbänder WP, Typen AR und DR		
<b>Verarbeitungshinweise</b>			
<b>Untergrundbeschaffenheit</b>	Ortbeton: muss sauber und trocken sein, frei von Ölen und Fetten sowie Graten, Kiesnestern, Staub und losen Teilen.  Spritzbeton: die Spritzbetonoberfläche darf das Verhältnis von 5 : 1 Länge : Breite nicht überschreiten und der Mindestradius muss 20 cm betragen. Die Spritzbetonoberfläche darf keine gebrochenen Anteile enthalten. Alle Leckagen müssen mit Sika® Dichtungsmörtel abgedichtet oder mit Sika® FlexoDrain drainagiert werden. Zur Erzielung der notwendigen Oberflächenstruktur kann es erforderlich sein, einen Feinspritzbeton in der Stärke von 5 cm zu applizieren, die Aggregate sollten eine Korngröße von 4 mm nicht überschreiten. Stahlteile (Stahlträger, Verstärkungsgitter, Anker etc.) müssen mit mind. 5 cm Feinspritzbeton überdeckt werden.  Die Oberfläche des Feinspritzbetons und Spritzbetons muss gereinigt werden (keine losen Bestandteile, Nägel, Kabel, etc.)		
<b>Verarbeitungsbedingungen / Limiten</b>			
<b>Untergrundtemperatur</b>	mind. 0 °C, max. +35 °C		
<b>Umgebungstemperatur</b>	mind. +5 °C, max. +35 °C  Bei Installation bei Umgebungstemperaturen < +5 °C müssen zur Einhaltung der lokalen Vorschriften möglicherweise spezielle Messprotokolle erstellt werden.		

## Verarbeitungsanweisung

### Verlegetechnik / Werkzeuge

Die Dichtungsbahnen werden lose verlegt und mechanisch befestigt - entsprechend der Sika Verlegeanleitung.

Alle Nähte müssen mit Handschweißgeräten und Andrückrollen oder mit Schweißautomaten verschweißt werden. Die Schweißtemperatur sowie die Schweißgeschwindigkeit müssen stufenlos einstellbar und elektronisch prüfbar sein.

Zur Nahtreinigung vor dem Verschweißen und zur Entfernung leichter Verschmutzung auf der Abdichtungsbahn wird Sika-Trocal® Cleaner 2000 eingesetzt.

Schweißparameter sind vor den Schweißarbeiten objektspezifisch einzustellen und an Mustern zu überprüfen.

### Anwendungseinschränkungen

Abdichtungsarbeiten sollen nur durch von Sika geschultes Personal ausgeführt werden.

Die Wasserdichtheit des Aufbaus gemäß den Spezifikationen des Kunden muss nach der Installation bestätigt werden.

SikaPlan® WP 1100 ist nicht UV-stabilisiert und darf daher nicht der permanenten UV-Bestrahlung ausgesetzt werden.

## Sicherheitsvorschriften

### Wichtige Sicherheitshinweise

Für detaillierte Angaben konsultieren Sie bitte das aktuelle Sicherheitsdatenblatt unter [www.sika.at](http://www.sika.at)

## Rechtliche Hinweise

Die Angaben, insbesondere die Vorschläge für die Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall zur Zeit der Drucklegung. Je nach den konkreten Umständen, insbesondere bezüglich Untergründen, Verarbeitung und Umweltbedingungen, können die Ergebnisse von diesen Angaben abweichen. Sika garantiert für ihre Produkte die Einhaltung der technischen Eigenschaften gemäß den Produktdatenblättern bis zum Verfalldatum. Produktanwender müssen das jeweils neueste Produktdatenblatt unter «[www.sika.at](http://www.sika.at)» abrufen. Es gelten unsere aktuellen allgemeinen Geschäftsbedingungen.



Sika Österreich GmbH  
Roofing  
Senderstrasse 10  
6960 Wolfurt  
Tel. +43 (0)5 0610 0  
Fax +43 (0)5 0610 1901  
[www.sika.at](http://www.sika.at)  
[roofing@at.sika.com](mailto:roofing@at.sika.com)



# PRODUKTDATENBLATT

## Sikalastic®-8800

HOCHREAKTIVE PUA-FLÜSSIGKUNSTSTOFFABDICHTUNG



### PRODUKTBESCHREIBUNG

2-komponentige, elastische, hochreaktive, lösemittel-freie Flüssigkunststoff-Abdichtung aus reinem Polyurea mit guter Chemikalienbeständigkeit. Ausschliesslich maschinell verarbeitbar.

### ANWENDUNG

Sikalastic®-8800 soll nur von erfahrenen Fachleuten verwendet werden.

- Abdichtung und Abrasionsschutz auf Beton, Stahl und anderen Untergründen
- Abdichtung von Wasserspeichern und Behältern
- Abdichtung von offenen Abwasseranlagen
- Abdichtung und Schutzbeschichtung in Schottertrögen
- Verschleisschutz von Stahl und Beton
- Rissüberbrückende Abdichtung unter Parkdeckbelägen
- Geeignet für MINERGIE-ECO Bauten

### VORTEILE

- Lösemittelfrei
- Hochreaktiv und schnellhärtend
- Nahezu sofortige Benutzbarkeit
- Bei Temperaturen von -20 °C bis +50 °C verarbeitbar
- Leistungsspektrum von -30 °C bis +100 °C
- Ausgezeichnete Rissüberbrückung
- Gute chemische Beständigkeit
- Ausgezeichnete Abriebfestigkeit
- UV-Bestrahlung kann zu Vergilbung führen

### UMWELTINFORMATIONEN

#### LEED Produktinformation

Geprüft nach SCAQMD Methode 304. Erfüllt die Anforderungen von LEED v2009 IEQ Credit 4.2:  
VOC < 100 g/l (less water)

#### MINERGIE-ECO Produktinformation

VOC-Gehalt < 1 % (gebrauchsfertiges Produkt)

### PRÜFZEUGNISSE

- Leistungserklärung (DoP) Nr. 0207020300100000411008: CE-Kennzeichnung gemäss den Anforderungen der Normen EN 1504-2:2004 durch den zertifizierten Fremdüberwacher 0921
- Geoscope GmbH, Steinfurt (DE): Bestimmung der Beständigkeit der Kunststoffmembrane im Autoklaventest in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 13438 - Prüfbericht Nr. 131303A vom 21.11.2013
- Eurofins Products Testing A/S, Galten (DK): Unbedenklichkeitserklärung (Bestimmung der Gesamtmigration und der Migration des Isocyanats) gemäss EN 1186 und EN 14338 - Prüfbericht Nr. G23435\_Ver2/BJ1 vom 04.09.2013
- Kiwa Polymer Institut GmbH, Flörsheim-Wicker (DE): Prüfung der statischen und dynamischen Rissüberbrückung gemäss DIN EN 1062-7 - Prüfbericht Nr. P8331a-E vom 14.02.2014
- Kiwa Polymer Institut GmbH, Hamburg (DE): Prüfung der Wurzelfestigkeit in Anlehnung an DIN 4062 - Prüfbericht Nr. P8395 vom 23.08.2013

### PRODUKTTINFORMATIONEN

Chemische Basis	Polyurea	
Lieferform	Komp. A (Iso):	212 kg (~ 189 l) Fass
	Komp. B (Harz):	191 kg (~ 189 l) Fass



Aussehen/Farbtön	Komp. A:	Transparent	
	Komp. B:	Grau	
	Komp. A + B:	Grau (ca. RAL 7004)	
Haltbarkeit	Im ungeöffneten Originalgebinde: 12 Monate ab Produktionsdatum		
Lagerbedingungen	Lagertemperatur zwischen +5 °C und +30 °C. Trocken lagern. Vor direkter Sonneneinstrahlung schützen.		
Dichte	Komp. A:	~ 1.12 kg/l (+20 °C)	
	Komp. B:	~ 1.01 kg/l (+20 °C)	
Festkörpergehalt	~ 99 %		
Viskosität		+20 °C	+25 °C
	Komp. A:	900 - 1 300 mPas	~ 750 mPas
	Komp. B:	600 - 850 mPas	~ 500 mPas

## TECHNISCHE INFORMATIONEN

<b>Shore D Härte</b>	> 50	(7 Tage, +23 °C, 50 % r.F.)	(DIN 53505)
<b>Mechanische Festigkeit</b>	~ 0 mg	(H17/1 000/1 000)	(ISO 5470-1
	~ 480 mg	(H22/1 000/1 000)	Taber Abraser Test)
<b>Zugfestigkeit</b>	> 20 N/mm <sup>2</sup>		(DIN 53504)
<b>Bruchdehnung</b>	~ 400 %		(DIN 53504)
<b>Rissüberbrückung</b>	Statisch:	Klasse A5 (+23 °C)	(DIN EN 1062-7)
	Dynamisch:	Klasse B4.2 (-20 °C)	
<b>Chemische Beständigkeit</b>	Beständig gegen viele Chemikalien. Bitte Technischen Berater der Sika Schweiz AG kontaktieren.		

## SYSTEMINFORMATIONEN

<b>System</b>	<b>Abdichten von Betonkonstruktionen</b>		
	<b>Beschichtung</b>	<b>Produkt</b>	<b>Verbrauch</b>
	Grundierung:	Sikadur®-188 Rapid <sup>1</sup> .	1 - 2 * 0.30 - 0.50 kg/m <sup>2</sup>
	Abstreuerung:	Leicht abgesandet mit Sikadur®-501 N (0.3-0.9)	~ 0.80 kg/m <sup>2</sup>
	Abdichtung (≥ 2 mm):	Sikalastic®-8800	~ 1.05 kg/m <sup>2</sup> /mm
	Versiegelung <sup>2</sup> :	Sikalastic®-8450 oder Sikafloor®-3570	0.70 - 0.90 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Abdichten von Stahlkonstruktionen</b>		
	<b>Beschichtung</b>	<b>Produkt</b>	<b>Verbrauch</b>
	Grundierung:	SikaCor® EG-1 <sup>3</sup> .	2 * ~ 0.22 kg/m <sup>2</sup>
	Abdichtung (≥ 2 mm):	Sikalastic®-8800	~ 1.05 kg/m <sup>2</sup> /mm
	Versiegelung <sup>2</sup> :	Sikalastic®-8450 oder Sikafloor®-3570	0.70 - 0.90 kg/m <sup>2</sup>
	<b>Sikafloor® OneShot PB-56 UV</b>		
	<b>Beschichtung</b>	<b>Produkt</b>	<b>Verbrauch</b>
	Grundierung:	Sikadur®-188 Rapid <sup>1</sup> .	1 - 2 * 0.30 - 0.50 kg/m <sup>2</sup>
	Abstreuerung:	Leicht abgesandet mit Sikadur®-501 N (0.3-0.9)	~ 0.80 kg/m <sup>2</sup>
	Abdichtung (≥ 2 mm):	Sikalastic®-8800	~ 1.05 kg/m <sup>2</sup> /mm
	Verschleisschicht:	Sikalastic®-8800	~ 1.00 kg/m <sup>2</sup>
		Mit eingeblasenem Sikadur®-501 N (0.3-0.9)	~ 2.00 kg/m <sup>2</sup>
	Versiegelung:	Sikalastic®-8450	0.70 - 0.90 kg/m <sup>2</sup>

## Systemaufbau für Parkdecks und Rampen

Beschichtung	Produkt	Verbrauch
Grundierung:	Sikadur®-188 Rapid <sup>1</sup> .	1 - 2 * 0.30 - 0.50 kg/m <sup>2</sup>
Abstreuerung:	Leicht abgesandet mit Sikadur®-501 N (0.3-0.9)	~ 0.80 kg/m <sup>2</sup>
Abdichtung (≥ 2 mm):	Sikalastic®-8800	~ 1.05 kg/m <sup>2</sup> /mm
Verschleisssschicht:	1 Gew.-Teil SikaCor® Elastomastic TF	~ 2.10 kg/m <sup>2</sup>
	+ 0.5 Gew.-Teil Sikadur®-504 N (0.1-0.3)	~ 1.40 kg/m <sup>2</sup> Bindemittel + ~ 0.70 kg/m <sup>2</sup> Sand
Abstreuerung:	Sikadur®-509 (0.7-1.2) <sup>4</sup> .	~ 8.00 kg/m <sup>2</sup>
Versiegelung:	Sikafloor®-359 N	0.70 - 0.90 kg/m <sup>2</sup>

1. Alternativ kann Sikadur®-188, Sikafloor®-156, Sikafloor®-160, Sikafloor®-161 oder Sikafloor®-701 verwendet werden. Bitte entsprechendes Produktdatenblatt beachten.
2. Sikalastic®-8800 ist UV-stabil. Bei direktem Sonnenlicht können Farbtonveränderungen vorkommen. Die technische Funktionalität wird dadurch nicht beeinträchtigt. Für eine einheitliche Farbgebung kann die Versiegelung appliziert werden.
3. Bei hoher korrosiver Belastung (Korrosivitätskategorie C3, z. B. in Becken) auf gestrahlten Stahloberflächen (Sa 2½) zusätzlich SikaCor® SW-500 verwenden.
4. Alternativ können auch spezielle Einstreustoffe (z. B. Alox) eingeblasen werden.

Dies sind theoretische Werte und beinhalten keine Zugaben für Oberflächenporosität, Oberflächenrauigkeit, Niveauunterschiede und Restmaterial im Gebinde etc.

## ANWENDUNGSGEHEIMNISSE

Mischverhältnis	Komp. A : B:	1 : 1 (Vol.-Teile)
Verbrauch	~ 1.05 kg/m <sup>2</sup> /mm	
Schichtdicke	> 2 mm Die Schichtdicke pro Arbeitsgang darf max. 4 mm betragen. Für das Auftragen einer grösseren Schichtdicke sind mehrere Arbeitsgänge erforderlich.	
Materialtemperatur	> +65 °C	
Lufttemperatur	Min. -20 °C, max. +40 °C Die Minimaltemperatur darf auch während der Aushärtung nicht unterschritten werden.	
Relative Luftfeuchtigkeit	Max. 85 %	
Taupunkt	Keine Kondensation! Die Untergrundtemperatur während der Applikation und Aushärtung muss mindestens 3 °C über dem Taupunkt liegen.	
Untergrundtemperatur	Min. +1 °C, max. +50 °C Die Minimaltemperatur darf auch während der Aushärtung nicht unterschritten werden.	
Aushärtezeit	~ 24 Stunden	(+20 °C)
Gelzeit	~ 11 Sekunden	(+20 °C)

## Wartezeit zwischen den Arbeitsgängen Überarbeitung von Sikalastic®-8800

Untergrundtemperatur	Minimum	1. Maximum1.
+10 °C	2 Minuten	6 Stunden
+20 °C	2 Minuten	6 Stunden
+30 °C	2 Minuten	6 Stunden

1. Falls die maximale Wartezeit überschritten wird, muss eine Haftbrücke mit Sikalastic®-810 + 15 Gew.-% Sika® Verdünnung S appliziert werden.

Diese Werte werden durch wechselnde Witterungsbedingungen beeinflusst, speziell durch Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit.

## VERARBEITUNGSANWEISUNG

### UNTERGRUNDVORBEREITUNG

Die Oberfläche muss sauber, trocken und frei von allen Verunreinigungen sein.

Im Zweifelsfall ist eine Musterfläche zu erstellen.

Sikalastic®-8800 wird immer auf einen Flächenspachtel oder alternativ auf eine Epoxidharzgrundierung appliziert. Bitte das Produktdatenblatt des jeweiligen Produktes beachten.

### MISCHEN

Die Dosierung und Mischung erfolgt mit geeigneter 2-Komponenten-Heisspitzanlage. Die beiden Komponenten müssen auf +70 °C aufgeheizt werden.

Misch- und Dosiergenauigkeit müssen in regelmäßigen Abständen überprüft werden.

Komp. B von Sikalastic®-8800 muss gründlich aufgerührt werden bis eine homogene Mischung mit einheitlichem Farbton erreicht ist. Dies muss mit einem Fassrührwerk geschehen.

### GERÄTEREINIGUNG

Arbeitsgeräte sofort nach Gebrauch mit Sika® Verdünnung S reinigen. Ausgehärtetes Material kann nur noch mechanisch entfernt werden.

Bei längeren Standzeiten die Heisspitzanlage reinigen, mit Mesamoll befüllen und unter leichten Überdruck halten.

## WEITERE HINWEISE

Bei der Applikation mittels Heisspitzanlage ist die Verwendung einer Schutzausrüstung zwingend erforderlich.

Sikalastic®-8800 nicht auf Flächen applizieren wo mit aufsteigender Feuchtigkeit zu rechnen ist.

Frisch applizierter Sikalastic®-8800 muss für mindestens 30 Minuten vor Dampf, Kondensation und Wasser geschützt werden.

Ungenügende Vorbehandlung von Rissen kann zu einer reduzierten Nutzungsdauer und erneuter Rissbildung führen.

Muss eine Einhausung beheizt werden, wird der Einsatz von elektrischen Heizgeräten empfohlen. Verbrennungs-Heizgeräte führen zur Entwicklung von Wasserdampf und Kohlendioxid, welche die Beschichtung beeinträchtigen können.

## MESSWERTE

Alle in diesem Produktdatenblatt angegeben technischen Daten basieren auf Laborversuchen. Aktuelle Messdaten können durch Umstände abweichen, die ausserhalb unseres Einflussbereiches liegen.

## LÄNDERSPEZIFISCHE DATEN

Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Daten für dieses Produkt aufgrund spezifischer nationaler Vorschriften von Land zu Land verschieden sein können. Die genauen Produktdaten entnehmen Sie bitte dem für das jeweilige Land gültigen Produktdatenblatt.

## ÖKOLOGIE, GESUNDHEITS- UND ARBEITSSCHUTZ

Für Informationen und Hinweise zur sicheren Handhabung, Lagerung und Entsorgung von chemischen Produkten beachte man das jeweils neueste Sicherheitsdatenblatt (SDB) mit physikalischen, ökologischen, toxischologischen und anderen sicherheitsbezogenen Daten.

## RECHTLICHE HINWEISE

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemässen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen Verkaufs- und Lieferbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte.

### Sika Schweiz AG

Tüffenwies 16  
CH-8048 Zürich  
Tel. +41 58 436 40 40  
Fax +41 58 436 45 84  
sika@sika.ch  
www.sika.ch



Produktdatenblatt  
Sikalastic®-8800  
Dezember 2018, Version 04.03  
020702050010000019

Sikalastic-8800-de-CH-(12-2018)-4-3.pdf

**BUILDING TRUST**







# IDROBIT

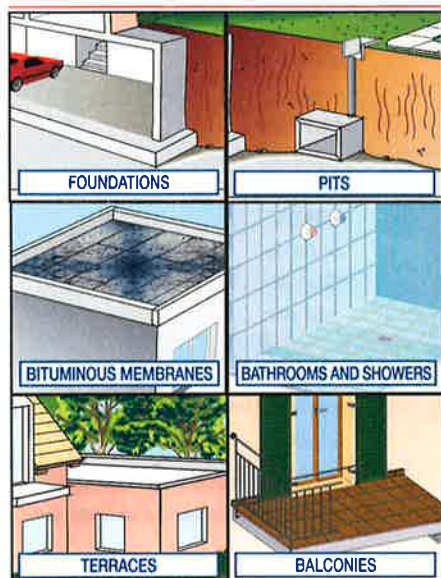
**WATER-BASED ONE-COMPONENT BITUMEN ELASTOMER PASTE  
WATERPROOFING COATING, READY TO USE,  
WITH HIGH ADHESION AND ELASTICITY;  
SUITABLE FOR WATERPROOFING OPERATIONS  
AND REPAIRING OLD BITUMEN COVERINGS**

**GRANTS LEED CREDITS**

CHARACTERISTICS			ENVIRONMENTAL	METHOD OF USE			PRECAUTIONS
ONE-COMPONENT	WATER BASED	WATERPROOFING	ECO GREEN	MIX MECHANICALLY	APPLY BY BRUSH	APPLY BY ROLLER	STORAGE: KEEP AWAY FROM FROST

## PROBLEM

**WATERPROOF: FOUNDATIONS, PITS, BATHROOMS, TERRACES, BALCONIES AND SLABS WITH DIFFICULT PARTS**

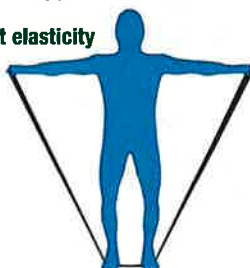


## SOLUTION

IDROBIT is a ready to use, semi-dense bitumen paste in aqueous solution. Its black colour is obtained from the mixture of special synthetic resins with special bitumens.

Once the bitumen paste thus obtained has dried, it becomes highly elastic and adherent to the surface and outstandingly waterproof.

**Excellent elasticity**



## APPLICATION FIELDS

IDROBIT is used to waterproof vertical and horizontal concrete, wood and ceramic surfaces,

insulation and bitumen membranes.

It is used to waterproof concrete slabs, foundations, difficult parts on roofs or terraces, bathrooms, etc.; it can also be used to repair bitumen coverings and/or for waterproofing in general.

**Large surface.** For surface areas over 50 m<sup>2</sup> or surfaces subject to strain, it is recommended to reinforce the product with RINFOTEX EXTRA (covered polyester non-woven fabric reinforcement spread and incorporated into the waterproofing in order to obtain improved waterproofing resistance levels), by burying the reinforcement into the first generous coat while it is still wet. The reinforcement overlaps must be 10 cm.

**Application on bituminous membranes**



## ADVANTAGES

- Non-toxic product.
- Excellent adhesion to the surface.
- Excellent water resistance.
- Excellent elasticity.

## METHOD OF USE

### • SUBSTRATE PREPARATION

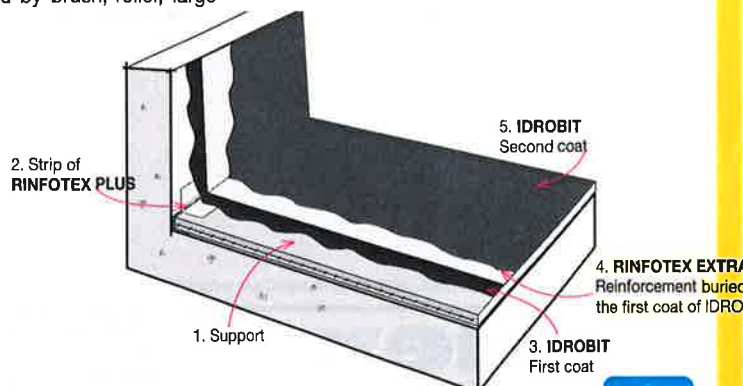
The concrete surfaces must be dry, perfectly clean and free from dust, oil, grease, non-uniform and crumbling or weakly anchored parts, remains of concrete, lime, plaster or paint. Check the planarity of the base, the mechanical performance, the surface consistency, the presence of suitable slopes and the residual humidity. Surfaces with humidity levels >3% must be treated with PRIMERBLOCK AB primer, which acts as a vapour barrier in order to prevent pieces coming away and bubbles from forming, for a consumption of about 1.5 kg/m<sup>2</sup>, or POLIDUR PRIMER with a consumption of 300 ml/m<sup>2</sup>. Deteriorated parts must be reinstated with special mortars to obtain an even and compact surface. In the event of overlaying on old floors, the anchoring must be checked; tiles that could possibly detach must be removed and their cavity grouted with quick-setting cement mortar. For

crumbling surfaces, apply the water-based primer, PRIMER FIX, using about 300 g/m<sup>2</sup>. Concrete surfaces must be perfectly clean and dry, free from dust, oil and crumbling/loose parts.

IDROBIT can be applied by brush, roller, large broom or airless spray gun with suitable filter. Apply "as is" or dilute with no more than 5% water.

### • COVERAGE

The theoretical consumption is 1 kg/m<sup>2</sup> for a dry film of 0.7 mm.



## TECHNICAL CHARACTERISTICS

	Standard	IDROBIT
Appearance		Paste
Colour		Black
Apparent density	EN 2811-1	1.30 ± 0.10 kg/l
Shelf life in original packaging (dry stored)		12 months
<b>Mix characteristics and workability</b>		
Application temperature		+5°C ÷ +35°C
Maximum application thickness		2 mm (two coats)
Waiting time - touch dry (*)		4 hours
Waiting time - complete drying (*)		4 days
Waiting time - recoating (*)		24 hours
Waiting time - for application of ceramic or paints (*)		4 days
Adhesives class for application of ceramic		C2S2, in compliance with EN 12004:2007+A1:2012
Application		manual or spray application
<b>Performance characteristics</b>		
	Standard	Product performance
<b>Class and Type</b>		
	EN 1504-2	<b>C PI-MC-IR</b>
Watertightness	EN 14891	>250 KPa - waterproof
Cold flexibility	UNI 1109	-20°C
Permeability to aqueous vapour	EN 7783	5 m ≤ Sd ≤ 50 m - class II
Adherence test	EN 1542	≥1.0 MPa
Initial adhesion strength - after 28 days	EN 14891	≥1.0 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - after water dipping	EN 14891	≥0.5 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - after basic water dipping	EN 14891	≥0.5 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - after chlorate water dipping	EN 14891	≥0.5 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - after heat	EN 14891	≥0.5 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - after thaw-frost cycles	EN 14891	≥0.5 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - to steel		≥1.0 N/mm <sup>2</sup>
Adhesion strength - to wood		≥1.0 N/mm <sup>2</sup>
Adherence - on bituminous membranes (pelage)	EN 12316-1	≥35.0 N
Ultimate tensile strength	NFT 46002	>1 000%
Ultimate tensile strength - with reinforcement RINFOTEX EXTRA	EN 12311-1	60±10%
Crack bridging ability at +20°C	EN 14891	>20 mm
Adhesion strength	NFT 46002	9±1 kg/cm <sup>2</sup>
Adhesion strength - with reinforcement RINFOTEX EXTRA	EN 12311-1	600 N
Capillary water absorption	EN 1062-3	w < 0.01 kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0.5</sup>
Permeability to CO <sub>2</sub>	EN 1062-6	Sd >50 m
Hazardous substances	EN 1504-2	in accordance to ZA.1 note

Test conditions: temperature 23±2°C, 50±5% R.H. and air velocity in test area <0.2 m/s. The data indicated may vary based on the specific conditions of the worksite: temperature, humidity, ventilation, porosity of the substrate.

(\*) The times indicated will be longer or shorter as the temperature drops or rises.

Pursuant to European standard EN 1504-9 - General principles for the use of products and systems.

(See previous)

### • PRECAUTIONS

- It is not suitable for painting concrete drinking water storage tanks.
- You can lay tiles onto IDROBIT using C2S2 adhesives.
- Wait between one coat and another for the layer below to dry completely.
- Minimum application temperature +5°C

- Do not apply in bad weather conditions because before it has dried completely it could be washed away with rainwater or ruined by frost.
- Do not apply in extremely hot and cold conditions.
- Treat the dry surface with a coat of PRIMER FIX to prevent stickiness, particularly in summer.
- For application on membranes, check the

surface finish before application. Slate or sand-blasted surfaces: cleaning is sufficient; Flamina gloss film: surface torching is necessary; Texflamina: must be new; talcum surface: must be cleaned with thinner or soap and water.

- The product must be stored in a cool place at temperatures of above +5°C and protected from direct sunlight. Keep away from frost. It cannot be used again if it freezes.

## PACKAGING

IDROBIT  
20-kg Pail  
5-kg Can

• FOR ANY FURTHER INFORMATION OR ADVICE ON PARTICULAR APPLICATIONS, CONTACT OUR TECHNICAL OFFICE • IN ORDER TO CORRECTLY USE OUR PRODUCTS, REFER TO INDEX TECHNICAL SPECIFICATIONS •

 <p>Construction Systems and Products</p> <p>Via G. Rossini, 22 - 37060 Castel D'Azzano (VR) - Italy - C.P.67 T. +39 045 8546201 - F. +39 045 518390</p>	<p>Internet: <a href="http://www.index-spa.com">www.index-spa.com</a> Informazioni Tecniche Commerciali <a href="mailto:tecom@indexspa.it">tecom@indexspa.it</a> Amministrazione e Segreteria <a href="mailto:index@indexspa.it">index@indexspa.it</a> Index Export Dept. <a href="mailto:index.export@indexspa.it">index.export@indexspa.it</a></p>		 <p>UNI EN ISO 9001</p>	 <p>UNI EN ISO 14001</p>	 <p>eco del GBC Italia</p>	
---	--	---	---	---	---	---

the numerous possible uses and the possible interference of conditions or elements beyond our control, we assume no responsibility regarding the results which are obtained. The purchasers, of their own accord and under their own

The figures shown are average indicative figures relevant to current production and may be changed or updated by INDEX at any time without previous warning. The advice and technical information provided, is what results from our best



## SYSTEMDATENBLATT

# Sikadur-Combiflex® SG System

## HOCHWERTIGES FUGENABDICHTUNGSSYSTEM

**BESCHREIBUNG**

Sikadur-Combiflex® SG System ist ein geklebtes Membranabdichtungssystem für Arbeitsfugen, Dehnfugen und Risse.

Sikadur-Combiflex® SG System besteht aus:

- Sikadur-Combiflex® SG Bändern in 1 mm und 2 mm Dicke, je nach Anwendung (modifizierte Abdichtungsbänder auf Basis von flexiblen Polyolefin (FPO))
- verschiedene Combiflex® Systemklebstoffe, je nach Anwendung (epoxidharzbasierend)

**ANWENDUNG**

Als Abdichtungssystem für Arbeitsfugen, Dehnfugen, Risse und Detailausbildungen wie Durchdringungen und Materialübergänge.

Zum Einsatz in:

- Trinkwasseranlagen und Speicher (nur in Verbindung mit dem Systemkleber Sika Cor®-146 DW)
- Tunnel und Durchlässe
- Untergeschosse
- Kraftwerksanlagen
- Kläranlagen
- Wasserrückhalteeinrichtungen
- Schwimmbecken

**PRODUKTMERKMALE/ VORTEILE**

- Ausgezeichnete Haftung auf zahlreichen Werkstoffen
- Hochflexibel - hohe Riss- und Fugenüberbrückungsfähigkeit
- Einfache Anwendung
- Hohe Bewegungsaufnahme
- Dauerhaft wasserdicht und witterungsbeständig
- Wurzelfest
- Anpassungsfähig an viele Objektsituationen

**PRÜFZEUGNISSE**

Sikadur-Combiflex® SG-System:

- Funktionsprüfung, STUVA Köln, (nur in Kombination mit dem Systemkleber Sikadur®-31 CF)
- Bestimmung für Wurzelbeständigkeit gemäß CEN/TS 14416

Prüfungen für den Einsatz im Trinkwasser:

- Hygiene-Institut des Ruhrgebiets - Umwelthygiene, Gelsenkirchen: Verhalten gegenüber Wasser nach KTW-Leitlinie (UBA)
- Vermehrung von Mikroorganismen nach DVGW, Arbeitsblatt W 270

## SYSTEMINFORMATIONEN

### Systemaufbau

Sikadur-Combiflex® SG System besteht aus einem flexiblen modifizierten Polyolefin (FPO)-Abdichtungsband und einem epoxidharzbasierenden Systemkleber.

#### Arbeitsfugen und Risse

#### Dehnfugen



#### Combiflex® SG Abdichtungsbänder

Sikadur Combiflex® SG-10 P

Sikadur Combiflex® SG-20 P

Sikadur Combiflex® SG-20 M

#### Kompatible Systemklebstoffe

- Sikadur Combiflex® CF Kleber Normal
- Sikadur Combiflex® CF Kleber Rapid
- Sikadur®-31 CF Normal (Bestandteil der Funktionsprüfung)
- Sikadur®-31 CF Rapid
- SikaCor®-146 DW (für Trinkwassereinsatz, muss mit Stellmittel T tixotropiert werden (4-6 Gew. %))

### Chemische Basis System

#### Abdichtungsbänder:

Modifizierte flexible Polyolefine (FPO)

#### Systemklebstoffe:

Epoxidharz (EP)

### Aussehen System

#### Sikadur-Combiflex® SG-10 P und Sikadur-Combiflex® SG-20 P

Flexible, hellgraue Membranabdichtungsbänder

#### Sikadur-Combiflex® SG-20 M

Flexible, hellgraue Membranabdichtungsbänder mit rotem Mittelstreifen

#### Sikadur Combiflex® CF Kleber und Sikadur®-31 CF

2-komponentiger Epoxidharzkleber, hellgrau (Farbe im gemischten Zustand)

#### Sika Cor® -146 DW

2-komponentiger Epoxidharzkleber, blau, beige, rotbraun (Farbe im gemischten Zustand)

## TECHNISCHE INFORMATIONEN

### Reißdehnung

> 650 %

(EN 12311-2)

#### Sikadur Combiflex® SG Band

#### Maximal zulässige Dehnbewegung unter Dauerbeanspruchung

Sikadur Combiflex® SG-20 P

< 25 % der nicht verklebten Bandzone

Sikadur Combiflex® SG-20 M

Sikadur Combiflex® SG-10 P

nur für Arbeitsfugen und Risse < 1 mm Fugenaufweitung

### Chemische Beständigkeit

Sikadur-Combiflex® SG System ist langfristig gegen alle in natürlichem Boden und Grundwasser vorkommenden aggressiven Stoffe, sowie gegenüber Meersalzwasser, Bitumen, Kalk-Zementmörtel sowie viele verschiedene Beschichtungen beständig. Grundsätzlich Beständigkeiten für den konkreten Fall immer vor Ausführung prüfen und bewerten!

## ANWENDUNGSGEOMETRIE

Materialverbrauch	Bandbreite	Banddicke	Verbrauch in kg/m
	100	1	0,7
	150	1	1,0
	200	1	1,2
	250	1	1,4
	150	2	1,1
	200	2	1,4
	250	2	1,7

Die angegebenen Werte sind rechnerisch/kalkulatorisch und stellen den Optimalfall dar. Sie dienen ausschließlich der Orientierung. Der effektive Verbrauch hängt von der Oberflächenrauigkeit, Tropfverluste, Applikationsbreiten etc. ab.

**Lufttemperatur** Bitte das entsprechende Produktdatenblatt des gewählten Systemklebers beachten.

**Untergrundtemperatur** Bitte das entsprechende Produktdatenblatt des gewählten Systemklebers beachten.

## PRODUKTEINFORMATIONEN

**Lieferform** Bitte das entsprechende Produktdatenblatt der Systemkomponente beachten.

**Lagerfähigkeit** Bitte das entsprechende Produktdatenblatt der Systemkomponente beachten.

**Lagerbedingungen** Bitte das entsprechende Produktdatenblatt der Systemkomponente beachten.

## VERARBEITUNGSANWEISUNG

### UNTERGRUNDQUALITÄT

Der Untergrund (im Regelfall Betonkonstruktion) muss trocken bis max. mattsfeucht, fest, sowie frei von Schmutz, drückendem und tropfenförmigen Wasser, losen und brüchigen Partikeln, haftmindernden Schichten und Substanzen, Ölen und Fetten oder anderen Verunreinigungen sein.

Die Mindesthaftzugfestigkeiten sind zu überprüfen, mind. 1,5 N/mm<sup>2</sup>.

Stahloberflächen müssen dem Reinheitsgrad Sa 2 1/2 entsprechen.

Der Klebeuntergrund muss wasserundurchlässig sein, da andernfalls die Abdichtung durch eine Umläufigkeit der Abklebekonstruktion verhindert wird.

Die Angaben stellen nur einen Auszug dar, bitte die vollständige aktuelle Verarbeitungsrichtlinie des Com-biflex® SG Systems sowie die korrespondierenden Produktdatenblätter der Systemkomponenten beachten.

### UNTERGRUNDVORBEREITUNG

Der Untergrund muss mit geeigneten Methoden vorbehandelt werden um die aufgeführten Untergrundanforderungen sicher zu stellen. Dies können beispielsweise Sandstrahlen, Wasserstrahlen, Kugelstrahlen oder abschleifen sein. Daraufhin ist der Untergrund gründlich zu entstauben.

Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Taupunkt je nach

Klebstoffwahl beachten.

Die Angaben stellen nur einen Auszug dar, bitte die vollständige aktuelle Verarbeitungsrichtlinie des Com-biflex® SG Systems sowie die korrespondierenden Produktdatenblätter der Systemkomponenten beachten.

### VERARBEITUNGSMETHODE/-GERÄTE

#### Auswahl des Abdichtungsbandes

Die Auswahl des geeigneten Abdichtungsbandes (Dicke und Breite) ist von den zu erwartenden Beanspruchungen abhängig.

- 1 mm dicke Bänder sind für Arbeitsfugen und Risse
- 2 mm dicke Bänder sind für Dehnfugen

Klebe- und Bandbreite gemäß zu erwartender Belastung bemessen. Details sind der aktuell gültigen Verarbeitungsrichtlinie zu entnehmen.

#### Mischen, Auftrag des Systemklebers und Bandapplikation

Gewählten Systemkleber entsprechend den Mischanweisungen (beziehen Sie sich auf das jeweilige Produktdatenblatt) mischen.

Den homogen gemischten Klebstoff mittels Spachtel oder Zahntraufel auftragen.

Schichtdicke des Klebstoffauftrages:

- Grundauftrag: mind. 1 - 2 mm
- Deckauftrag: mind. 1 - 2 mm

Bei Verschmutzung des Sikadur-Combiflex® SG Band mit trockenem oder nassem Lappen reinigen. Zur Reinigung nur Wasser und kein Lösemittel verwenden. Vor der Applikation ist das Abdichtungsband auf Beschädigungen zu prüfen.

Sikadur-Combiflex® SG Band in den Klebstoffgrundauftrag einbetten und mit einem geeigneten Hilfsmittel fest in den Klebstoff eindrücken. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Luft eingeschlossen wird.

Die Bandmitte darf bei Dehnfugen und Bewegungsrisen > 1 mm auf keinem Fall mit dem Untergrund verklebt werden. Dazu kann der Untergrund über dem Riss, bzw. beidseitig entlang der Fugenränder mit einem Klebeband abgedeckt werden. Es ist ein entsprechender klebefreier Dehnbereich auszubilden.

Klebeband vor dem Einlegen des Sikadur-Combiflex® SG Bandes (roter Mittelstreifen nach oben) wieder entfernen. Durch das nachfolgende Anpressen (frei von Lufteinlässen) des Abdichtungsbandes wird der Klebstoff des Grundauftrages hohlraumfrei verquetscht.

Deckschicht aus dem Systemkleber herstellen, ggf. klebefreien Dehnbereich beachten. Anschließend den roten Mittelstreifen (wenn gewählt) und die Abdeckbänder auf beiden Seiten entfernen, um eine saubere und genaue Ausführung sicherzustellen.

Bei Abdichtungen von Arbeitsfugen oder Rissen bis 1 mm Aufweitung kann das Abdichtungsband vollflächig mit dem Klebstoff bedeckt werden (mechanischer Schutz).

Die Angaben stellen nur einen Auszug dar, bitte die vollständige aktuelle Verarbeitungsrichtlinie des Combiflex® SG Systems sowie die korrespondierenden Produktdatenblätter der Systemkomponenten beachten.

#### **Bandverbindungen**

Die Abdichtungsbänder werden durch thermische Verschweißung mittels Heißluft und Druck verbunden. Die Schweißstellen müssen vor der Verschweißung mittels Schleifpapier oder Scotch Brite angeschliffen werden. Nur Schweißstellen anschleifen, da der mechanische Abrieb die Verklebung mit dem Systemkleber beeinträchtigt.

Es ist eine Überlappung von 4 - 5 cm bei Bandverbindungen, T-Stücken, L-Stücken oder dergleichen vorzusehen.

Schweißtemperatur: +360 °C - +420 °C

1. Heften zur Bandfixierung
2. Vorschweißung ca. 20 min
3. Endschweißung ca. 20 mm

Die Angaben stellen nur einen Auszug dar, bitte die vollständige aktuelle Verarbeitungsrichtlinie des Combiflex® SG Systems sowie die korrespondierenden Produktdatenblätter der Systemkomponenten beachten.

## **WEITERE DOKUMENTE**

Zusammen mit diesem Produktdatenblatt sind zusätzlich folgende weitere Unterlagen in Kombination zu beachten:

- aktuelle Verarbeitungsrichtlinie des Combiflex® SG Systems
- die jeweiligen aktuellen Produktdatenblätter der einzelnen Systemkomponenten

## **WEITERE HINWEISE**

- Bei Fugen, die einem Wasserdruck ausgesetzt sind, muss das Sikadur-Combiflex® SG Band abgestützt werden. Dafür ist eine geeignete Unterstützungskonstruktion zu berücksichtigen
- Bei positivem Wasserdruck erfolgt die Unterstützungskonstruktion in der Regel durch das vorhandene Fugenfüllmaterial
- Bei negativem Wasserdruck muss das Abdichtungsband durch ein Schleppblech gestützt werden. Dabei muss die Konstruktion die zu erwartenden Verformungen schadfrei aufnehmen können.
- Das Sikadur-Combiflex® SG Band muss vor allem bei Dehnfugen (Klebefreier Dehnbereich) vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.
- Sikadur-Combiflex® SG Band kann nicht mit Sikaplan® WT Kunststoff-Dichtungsbahnen oder Hypolan basierten Bändern verschweißt werden

## MESSWERTE

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

## LÄNDERSPEZIFISCHE DATEN

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt sind gültig für das von der Sika Deutschland GmbH ausgelieferte Produkt. Bitte beachten Sie, dass Angaben in anderen Ländern davon abweichen können. Beachten Sie das im Ausland gültige Produktdatenblatt.

## ÖKOLOGIE, GESUNDHEITS- UND ARBEITSSCHUTZ

### Sikadur Combiflex® SG Tape

Verordnung der europäischen Gemeinschaft über Chemikalien und ihre sichere Verwendung (REACH: EC 1907/2006) Dieses Produkt ist ein Erzeugnis von REACH. Es enthält keine Stoffe, die bei üblicher Anwendung aus dem Erzeugnis freigesetzt werden. Folglich gibt es keine Registrierungspflicht für in diesem Produkt enthaltene Stoffe gemäß Artikel 7.1 der Verordnung. Aufgrund unserer derzeitigen Kenntnisse enthält dieses Produkt keine SVHC<sup>2</sup> (besonders besorgniserregende Stoffe) aus der REACH-Kandidatenliste, die durch die Europäische Agentur für chemische Stoffe in Konzentrationen über 0,1% (Gewichtseinheit) veröffentlicht wurde. 1= Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals 2 = Substances of very high concern

### Sikadur® Adhesives

Für Informationen und Beratung über die sichere Handhabung, Lagerung und Entsorgung von chemischen Produkten bitte das aktuelle Sicherheitsdatenblatt (SDB) verwenden, in dem physikalische, ökologische, toxikologische und andere sicherheitsrelevante Daten enthalten sind. Weitere Hinweise und Infodatenblätter zur Produktsicherheit und Entsorgung finden Sie im Internet unter [www.sika.de](http://www.sika.de).

## RECHTLICHE HINWEISE

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und entsprechend der Vorgaben unserer jeweiligen Produktdatenblätter angewandt. Wegen der unterschiedlichen Materialien, Untergründen und abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen, noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass er schriftlich alle Informationen und Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, rechtzeitig und vollständig an Sika übermittelt hat. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck eigenverantwortlich zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen, einzusehen und herunterzuladen unter [www.sika.de](http://www.sika.de). Es gilt das jeweils neueste Produktdatenblatt, das von uns angefordert oder im Internet unter [www.sika.de](http://www.sika.de) heruntergeladen werden kann.

### Sika Deutschland GmbH

Flooring / Waterproofing

Kornwestheimer Straße 103-107

D-70439 Stuttgart

Telefon: 0711/8009-0

E-Mail: [flooring\\_waterproofing@de.sika.com](mailto:flooring_waterproofing@de.sika.com)

[www.sika.de](http://www.sika.de)



### SYSTEMDATENBLATT

Sikadur-Combiflex® SG System

Mai 2019, Version 02.03

020703900000000003

Sikadur-CombiflexSGSystem-de-DE-(05-2019)-2-3.pdf

## PRODUKTDATENBLATT

## Sikaplan® WT Tape-200

## ANSCHLUSS- UND ABSCHOTTUNGSBAND (FPO)

## PRODUKTBESCHREIBUNG

Anschluss- und Abschottungsband (FPO) mit guten Haftungseigenschaften zu Sikadur® Epoxidharz-Klebstoffen.

Ermöglicht eine dichte Verbindung der Sikaplan® WT Kunststoff-Dichtungsbahnen zum Untergrund.

Materialdicke: 2.00 mm

## ANWENDUNG

Sikaplan® WT Tape-200 soll nur von erfahrenen Fachleuten verwendet werden.

- Dichter An- und Abschluss von Sikaplan® WT Kunststoff-Dichtungsbahnen mit dem Betonuntergrund
- Zur Ausbildung von Abschottungsfelder bei Tag- und Untertagbautunneln
- Für FPO

## VORTEILE

- Hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung
- Dauerhaft beständig gegen Wasser
- Enthält keine Weichmacher
- Mit Heissluft schweisssbar
- Gute Kälteflexibilität
- Bitumenbeständig
- Ausgezeichnete Haftung auf zahlreichen Untergründen
- Geeignet für Abschottungsfelder bei Tag- und Untertagbautunneln

## PRODUKTINFORMATIONEN

Chemische Basis	Modifizierte flexible Polyolefine basierend auf PE	
Lieferform	Rollenmass	
	Rollenbreite:	200 mm
	Rollenlänge:	20 m
Aussehen/Farbtone	Beschaffenheit:	Homogen
	Oberfläche:	Glatt
	Farbe Oberschicht:	Grau (Signalschicht)
	Farbe Unterschicht:	Schwarz
Dicke	2.00 (-5/+10 %) mm	(EN 1849-2)
Haltbarkeit	Im ungeöffneten Originalgebinde: 24 Monate ab Produktionsdatum	
Lagerbedingungen	Lagertemperatur zwischen +5 °C und +30 °C. Rollen müssen in der Originalverpackung, liegend, kühl und trocken gelagert werden. Rollen müssen gegen direkte Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee, Eis etc. geschützt werden.	



## TECHNISCHE INFORMATIONEN

<b>Zugfestigkeit</b>	Längs-/Querrichtung:	> 20 N/mm²	(EN ISO 527)
<b>Dehnung</b>	Längs-/Querrichtung:	≥ 700 %	(EN ISO 527)
<b>Weiterreissfestigkeit</b>	Längs-/Querrichtung:	≥ 65 kN/m	(EN 12310-2)
<b>Brandverhalten</b>	Klasse E	(SN EN ISO 11925-2, EN 13501-1)	
<b>Gebrauchstemperatur</b>	Bitte das aktuelle Produktdatenblatt des gewählten Sikadur® Klebstoffes beachten.		

## SYSTEMINFORMATIONEN

<b>Systemaufbau</b>	<b>Band:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sikaplan® WT Tape-200</li></ul> <b>Reiniger, Aktivator</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Wasser</li></ul> <b>Kompatible Sikadur® Klebstoffe:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sikadur-Combiflex® CF (Typ Normal und Rapid)</li><li>▪ Sikadur®-31 CF (Typ Normal und Rapid)</li><li>▪ Sikadur®-33</li></ul> <b>Kunststoff-Dichtungsbahnen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sikaplan® WT 1200</li><li>▪ Sikaplan® WT 2200</li><li>▪ Sikaplan® WT 5200</li><li>▪ Sikaplan® WT 6200</li><li>▪ Weitere Dichtungsbahnen auf Anfrage</li></ul>
---------------------	---

## ANWENDUNGSGEOMETRIE

<b>Verbrauch</b>	Sikadur® Klebstoff: ~ 1.2 kg/m/mm Der Verbrauch ist abhängig von der Untergrundrauigkeit.
<b>Lufttemperatur</b>	Bitte das aktuelle Produktdatenblatt des gewählten Sikadur® Klebstoffes beachten.
<b>Untergrundtemperatur</b>	Bitte das aktuelle Produktdatenblatt des gewählten Sikadur® Klebstoffes beachten.

## VERARBEITUNGSANWEISUNG

### UNTERGRUNDBESCHAFFENHEIT

Bitte das aktuelle Produktdatenblatt des gewählten Sikadur® Klebstoffes beachten.

### UNTERGRUNDVORBEREITUNG

Der Untergrund muss tragfähig, trocken oder mattsfeucht, sauber und frei von Zementmilch, Eis, stehendem Wasser, Fett, Öl, alten Oberflächenbehandlungen oder Anstrichen sein.

Lose oder schlecht haftende Teile müssen entfernt werden, um eine offene Oberflächenstruktur zu erhalten.

## VERARBEITUNGSMETHODE/-GERÄTE

### Bandvorbereitung

Das Band auf Beschädigungen (tiefe Risse) von Lagerung resp. Transport hin prüfen und kritische Teile falls notwendig entfernen.

Zur Reinigung die schwarze Seite des Sikaplan® WT Tape-200 nur mit Wasser und einem sauberen Tuch reinigen.

**Wichtig:** Keine Reiniger verwenden.

### Bandverbindungen

Bänder werden durch thermische Verschweissung mittels Heissluft und Druck verbunden. Beide Seiten des Bandes im Bereich von Schweissstellen müssen vor der Verschweissung mittels Scotch Brite oder Schleifpapier angeschliffen werden.

Nur Schweissstellen anschleifen, da der mechanische Abrieb die Verklebung beeinträchtigen kann.

Überlappung:	4 - 5 cm
Schweisstemperatur:	+280 °C bis +320 °C

### Bandapplikation

Die Klebfläche kann durch seitliches Abkleben mit Klebeband einfach abgegrenzt werden. Klebeband vor dem Einlegen des Sikaplan® WT Tape-200 wieder entfernen.

Den gut gemischten Sikadur® Klebstoff mittels Spachtel oder Zahntraufel auf den Untergrund auftragen.

Im Bereich von Stumpfschweissungen auf der schwarzen Seite von Sikaplan® WT Tape-200 vorgängig Klebstoff auftragen, um einen horizontalen Wasserdurchfluss im Bereich der Schweissnaht zu verhindern.

Schichtdicke des Klebstoffes:	1 - 2 mm
Auftragsbreite:	Min. 220 mm

Sikaplan® WT Tape-200 innerhalb der Offenzeit des Klebstoffes einbetten und mit einem geeigneten Roller fest in den Klebstoff eindrücken. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Luft eingeschlossen wird. Dabei sollte der Klebstoff auf beiden Seiten des Sikaplan® WT Tape-200 um ca. 5 mm ausgedrückt werden. Bei vertikaler oder Überkopf-Applikation muss das Band bis zur Anhärtung des Klebers fixiert werden, um Ablösungen zu vermeiden und eine gute Haftung zum Untergrund sicherzustellen.

### Anschluss an Sikaplan® WT Kunststoff-Dichtungsbahnen

Die graue Seite des Sikaplan® WT Tape-200 muss vor der Verschweissung mittels Scotch Brite oder Schleifpapier angeschliffen werden.

Sikaplan® WT Tape-200 und die Sikaplan® WT Kunststoff-Dichtungsbahnen müssen vor der Verschweissung sauber und trocken sein.

**Wichtig:** Keine Reiniger verwenden.

Die Kunststoff-Dichtungsbahnen dürfen frühestens 24 Stunden nach Applikation des Sikaplan® WT Tape-200 Systems (abhängig von Aushärtung des Klebers) aufgeschweisst werden.

Schweisparameter müssen auf der Baustelle durch Vorversuche ermittelt werden.

## WEITERE HINWEISE

Die Verlegearbeiten dürfen nur durch von Sika® anerkannten Unternehmern erfolgen.

Klebebänder dürfen nicht auf der schwarzen Seite von Sikaplan® WT Tape-200 verwendet werden.

Sikaplan® WT Tape-200 ist nicht UV-stabilisiert und darf nicht bei Bauwerken eingesetzt werden die permanentem UV-Licht und Wetter ausgesetzt sind.

## MESSWERTE

Alle in diesem Produktdatenblatt angegebenen technischen Daten basieren auf Laborversuchen. Aktuelle Messdaten können durch Umstände abweichen, die ausserhalb unseres Einflussbereiches liegen.

## LÄNDERSPEZIFISCHE DATEN

Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Daten für dieses Produkt aufgrund spezifischer nationaler Vorschriften von Land zu Land verschieden sein können. Die genauen Produktdaten entnehmen Sie bitte dem für das jeweilige Land gültigen Produktdatenblatt.

# ÖKOLOGIE, GESUNDHEITS- UND ARBEITSSCHUTZ

## VERORDNUNG (EG) NR. 1907/2006 - REACH

Dieses Produkt ist ein Erzeugnis wie in Artikel 3 der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH). Es enthält keine Stoffe, die bei üblicher Anwendung aus dem Erzeugnis freigesetzt werden. Ein Sicherheitsdatenblatt nach Artikel 31 der gleichen Verordnung ist nicht erforderlich, um dieses Produkt auf den Markt zu bringen, zu transportieren oder es anzuwenden. Für die sichere Nutzung befolgen Sie die Anweisungen aus diesem Merkblatt. Aufgrund unserer derzeitigen Kenntnisse enthält dieses Produkt keine SVHC (besonders besorgniserregende Stoffe) in Anhang XIV der REACH-Verordnung oder auf der Kandidatenliste von der Europäische Agentur für chemische Stoffe in Konzentrationen über 0.1 % (w/w) veröffentlicht wurde.

## RECHTLICHE HINWEISE

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemässen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen Verkaufs- und Lieferbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte.

### Sika Schweiz AG

Tüffenwies 16  
CH-8048 Zürich  
Tel. +41 58 436 40 40  
sika@sika.ch  
www.sika.ch



### Produktdatenblatt

Sikaplan® WT Tape-200  
November 2019, Version 01.01  
020703150200000013

SikaplanWTTape-200-de-CH-(11-2019)-1-1.pdf





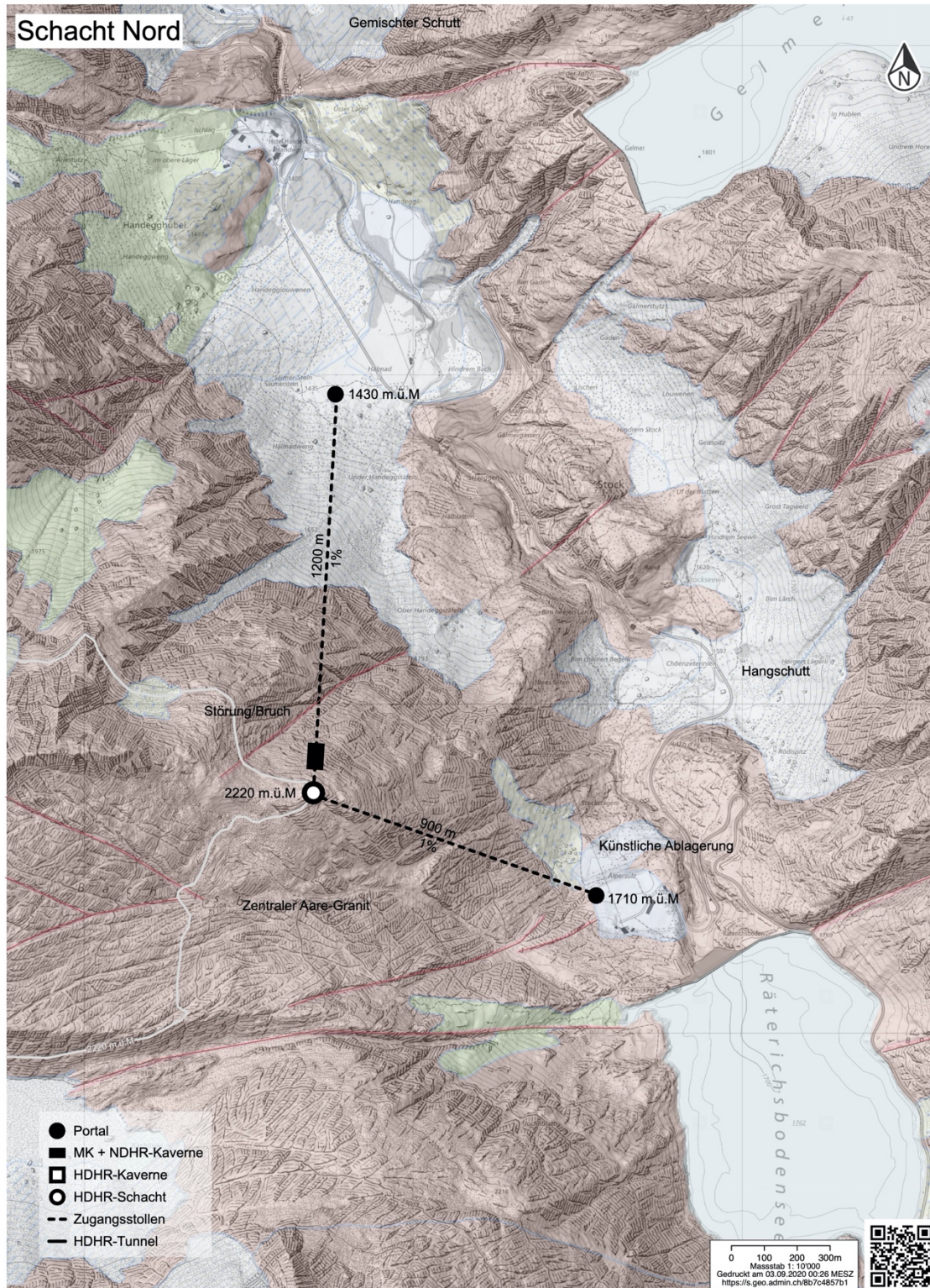
## 5.2 Legende zur Geologischen Karte in Abbildung 23

	Silte bis Sande mit Kiesen, Steinen und Blöcken
	Silte bis siltige Sande, oft tonig, meist kalkhaltig
	Tonige Silte, bis Tone mit Sandlagen
	Kiese und Sande
	Kiese und Sande, z.T. mit tonigen oder siltigen Lagen
	Sande, Kiese, Steine, Blöcke
	Blockschutt und Gehängeschutt
	Mergel mit schwach verfestigten Sandstein-, Konglomerat- oder Gerölllagen
	Vorwiegend kalkhaltige, porenreiche Sandsteine mit Mergellagen
	Mergel mit Lagen von muschelreichen Sandsteinen bis Muschelbrekzien
	Mergel und Schiefertone mit Kalk-, Dolomit-, Sandsteinbänken
	Tonschiefer mit Einlagerungen von Dolomiten, Rauwacken, Gipsgesteinen, Kalksteinen und Sandsteinen
	Eisenschüssige Tone
	Mergel mit Lagen von stärker verfestigten Sandsteinen
	Sandsteine mit Mergellagen
	Mergel mit Lagen von festen, sandigen Muschelbrekzien
	Quarzsandsteine bis sandige Tonschiefer
	Konglomerate mit Sandstein- und Mergellagen
	Sandstein- und Mergellagen mit Lagen von schwach bis mittelstark verfestigten Konglomeraten
	Konglomerate bis Brekzien mit Arkosen und Sandsteinen
	Brekzien und Konglomerate
	Tonschiefer bis Phyllite mit Einlagerungen von Sandsteinen und Brekzien bis Konglomeraten
	Mergelschiefer bis Kalkphyllite mit Einlagerungen von Sandsteinen
	Feste, kompakte Sandsteine mit Lagen von Mergelschiefen und Kalkphylliten
	Mergelschiefer bis Kalkphyllite mit Lagen von vulkanischen Tuffsandsteinen
	Kalkphyllite bis Kalkglimmerschiefer
	Kalkphyllite bis Kalkglimmerschiefer mit Lagen von marmorisierten Kalken und Dolomiten
	Kalkphyllite bis Kalkglimmerschiefer mit Lagen von Grüngesteinen
	Kalksteine allgemein, häufig mit mergeligen Zwischenlagen
	Kalksteine, oft etwas mergelig
	Kalksteine mit bedeutenden Lagen von Mergeln, Mergelschiefen und Mergelkalken
	Kieselkalke
	Sandkalke bis Kieselkalke mit Lagen von Mergelschiefen
	Glaukonitführender Quarzsandstein mit Echinodermenbruchstücken
	Kalkbrekzien oder Kalkkonglomerate
	Kalksteine bis Kalkmarmore
	Kalksteine mit Dolomitlagen
	Dolomitgesteine z.T. mit Kalklagen
	Dolomite und Rauwacke
	Dolomite mit Gipslagen
	Dolomitmarmore
	Radiolante
	Vulkanite und Pyroklastika
	Granite mit Übergängen in Quarzdiorite und Quarzsyenite
	Granite mit Serizit, Epidot und Chlorit
	Syenite
	"Quarzporphyre"
	Porphyrite und Porphyrituffe
	Quarzphyllite
	Gneise mit reichlich Feldspat
	Gneise mit reichlich Feldspat, verschiefert unter Serizit-, Epidot- und Chloritbildung
	Zweiglimmer- bis Biotitgneise feldspatreich von wechsellagerter Struktur
	Zweiglimmer- bis Biotitgneise, feldspatreich, vorwiegend homogener Ausbildung
	Zweiglimmer- bis Biotitgneise, feldspatreich, plattig
	Zweiglimmer- bis Biotitgneise, mit hellen oft grünen Glimmern (Phengit)
	Biotit- bis muskovitreiche Gneise und Glimmerschiefer
	Biotit- bis muskovitreiche Gneise z.T. chloritführend, z.T. mit Kalksilikatfelsen oder mit Quarzitlagen (Hornfelse)
	Serizit-Chloritgneise bis -schiefer
	Serizitreiche Konglomerate und Brekzien
	Serizit-Chloritgneise bis -schiefer, oft sehr quarzreich mit dünnen Amphibolitlagen
	Quarzite
	Amphibolite mit Übergängen in Diorite und in hornblendeführende Gneise
	Mischzone von Amphiboliten und Gneisen
	Diorite und Gabbros
	Grünschiefer mit Übergängen in basische Eruptivgesteine, Eklogit
	Serpentinite
	Peridotite und Olivinfelse
	Oberflächengewässer, Seen
	Gletscher





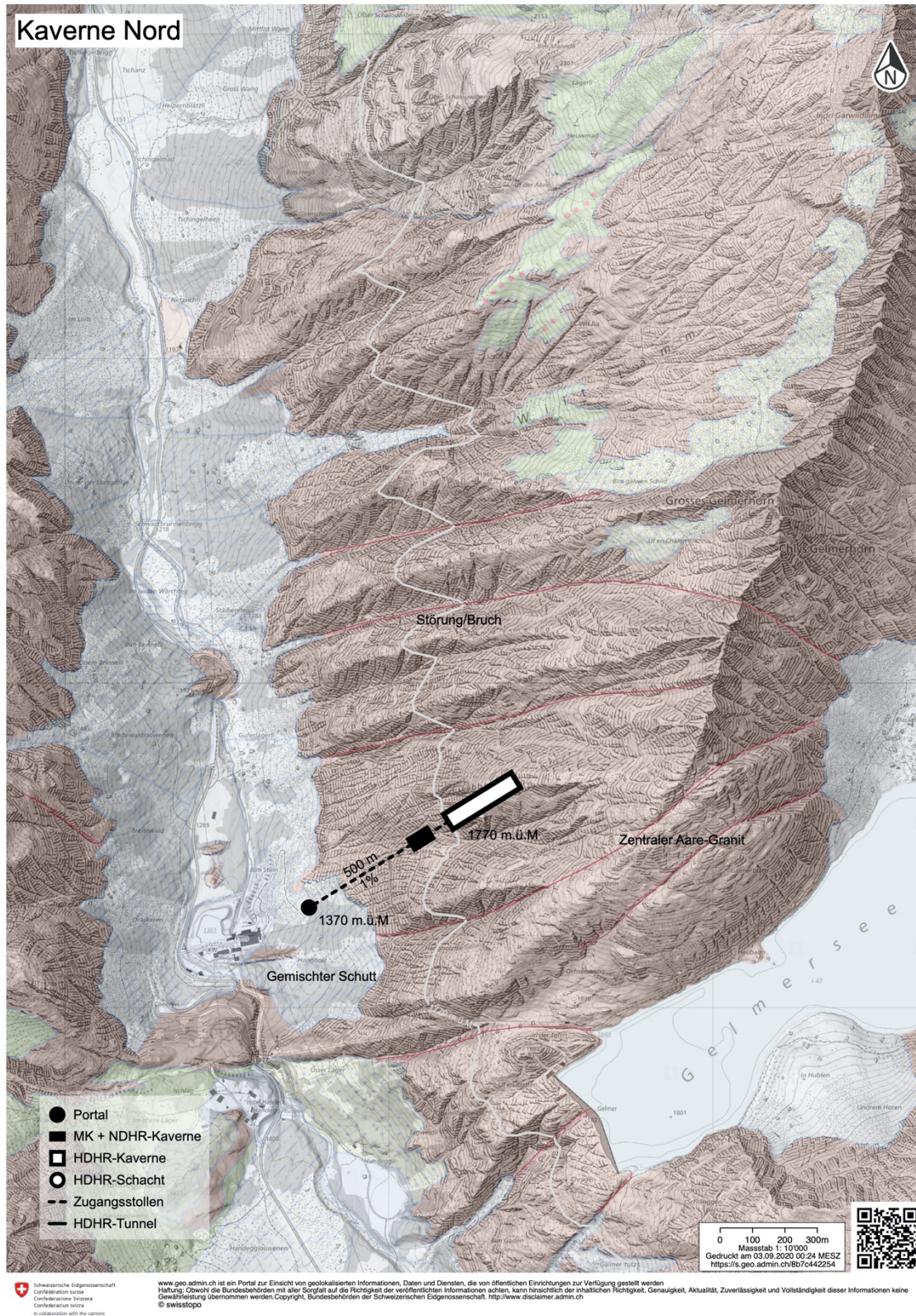
### 5.3 Auslegung Variante «Schacht Nord»







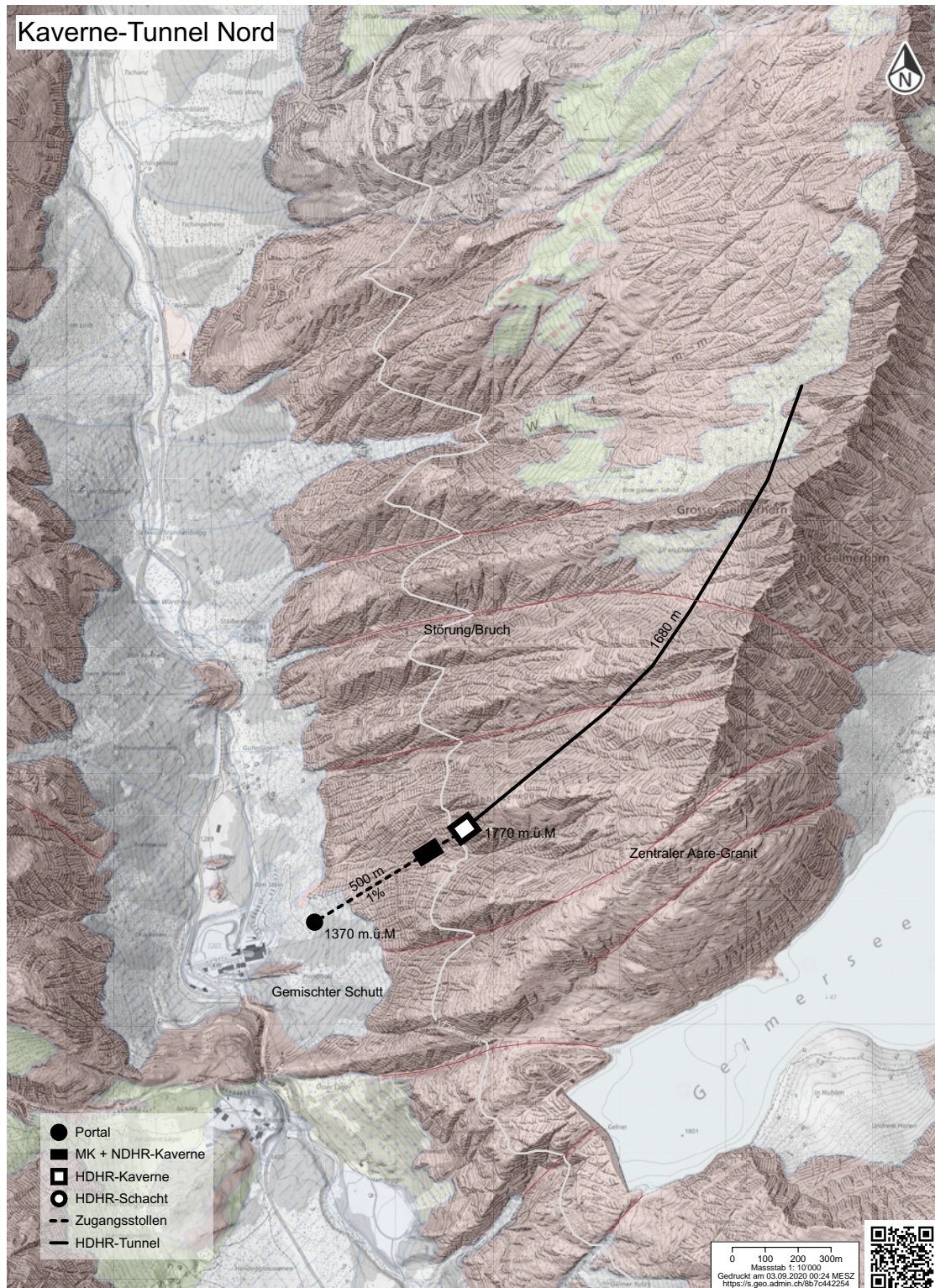
## 5.4 Auslegung Variante «Kaverne Nord»







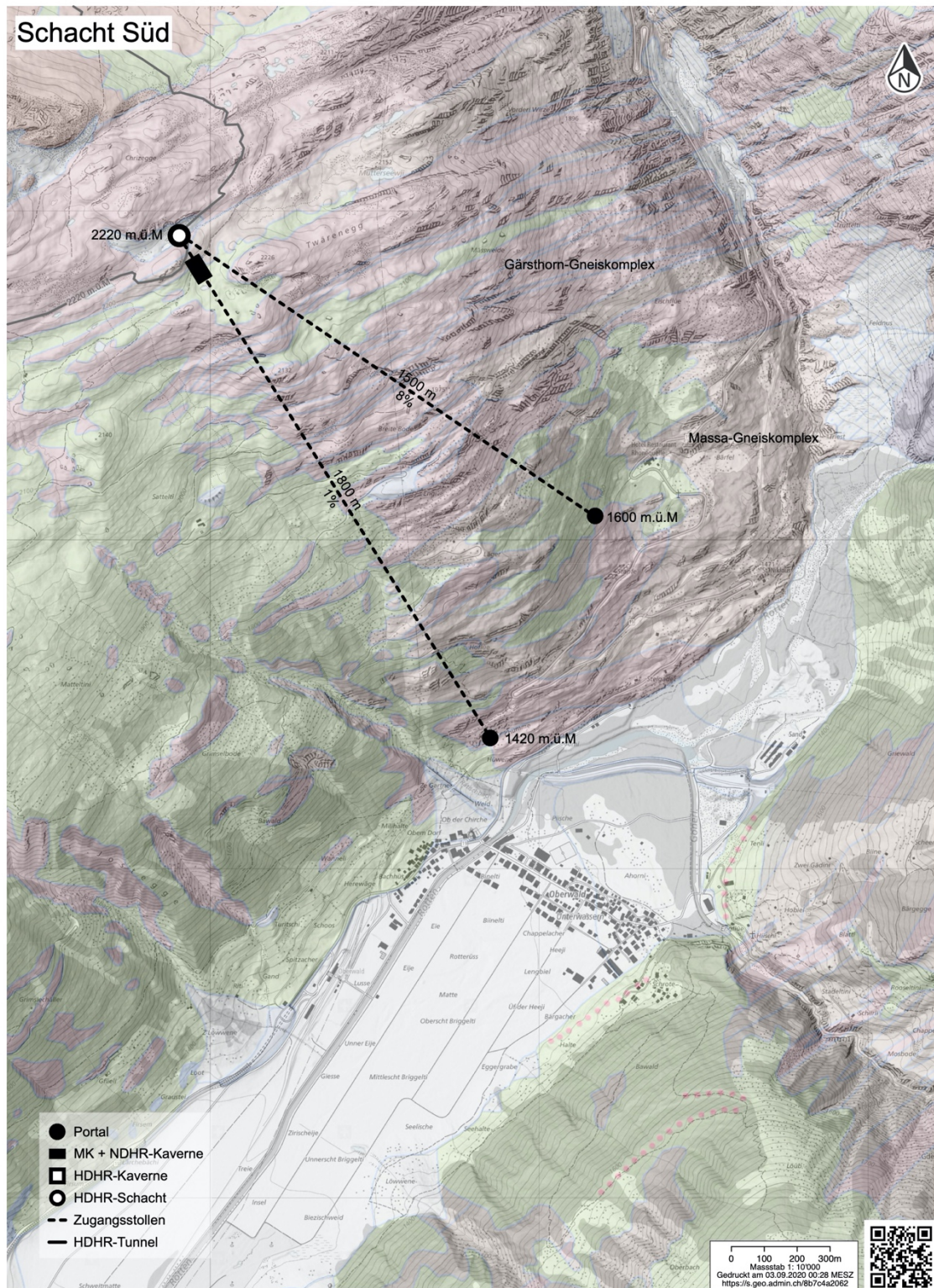
## 5.5 Auslegung Variante «Kaverne-Tunnel Nord»







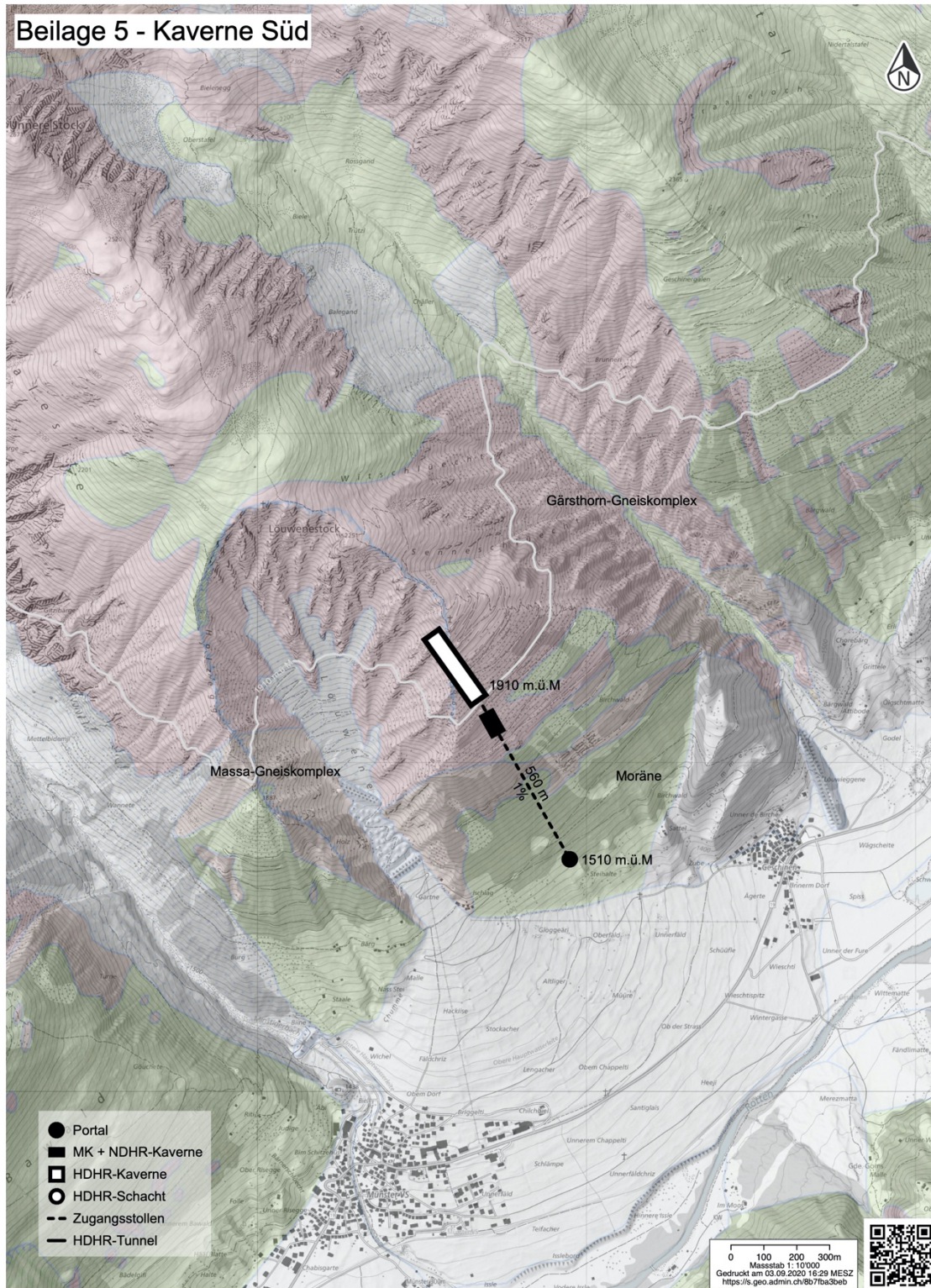
## 5.6 Auslegung Variante «Schacht Süd»







## 5.7 Auslegung Variante «Kaverne Süd»







## 5.8 Auslegung Variante «Kaverne-Tunnel Süd»

