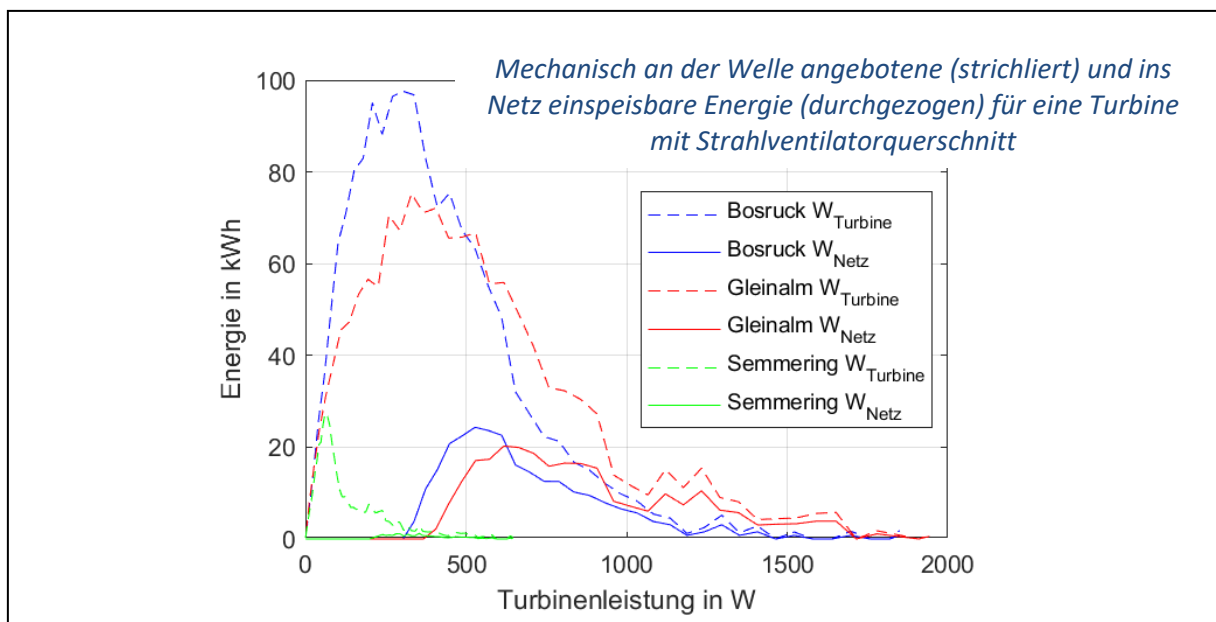


# Tunnelkraftwerk

Möglichkeit von Stromerzeugung aus meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2021  
**VIF 2021**

Juni 2023






## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Austro Tower  
Schnirchgasse 17  
1030 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme  
Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 19  
8010 Graz



Institut für elektrische Antriebstechnik und Maschinen  
Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 18/1  
8010 Graz



**Programmmanagement:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Thematische Programme

Sensengasse 1

1090 Wien



# Tunnelkraftwerk

Möglichkeit von Stromerzeugung aus meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung

VIF 2021

**Autorinnen und Autoren:**

**Peter STURM, Daniel FRUHWIRT**

ITn/TU Graz

**Roland SEEBACHER, Klaus KRISCHAN**

EAM/TU Graz

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Technische Universität Graz

ITnA Bericht Nr. I-30/23/PSt/V&U Inst\_21/014/1640

<https://doi.org/10.3217/0aa6q-c0k47>

## Abstract

Im Rahmen des Forschungsprojektes Tunnelkraftwerk (Förderprogramm Mobilität der Zukunft MdZ-VIT, FFG Projekt 893655) waren Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln zur Stromproduktion zu untersuchen.

In einem ersten Schritt erfolgte eine Potenzialanalyse für Standardtunnel (2-streifiger Querschnitt) mit unterschiedlichen Längen und meteorologischen Druckdifferenzen. In einem zweiten Schritt wurden dann für österreichische Tunnelanlagen die treibenden Druckdifferenzen zwischen Portalen bzw. über Schächte erhoben und für ausgewählte Anlagen die mögliche nutzbare Jahresenergie berechnet.

Die Berechnung der Jahresenergiemengen einer möglichen Stromerzeugung erfolgte auf Basis real vorherrschender Druckdifferenzen bei Tunnelanlagen im österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz. Anhand der vorliegenden Messdaten wurden jene Tunnelanlagen für eine weitere Betrachtung ausgewählt, die eine höhere bis hohe meteorologisch bedingte Druckdifferenz aufweisen. Unter Berücksichtigung der aerodynamischen Bedingungen sowie der zu erwartenden Wirkungsgrade bei der Verstromung kann somit eine erwartbare Jahresenergiemenge abgeschätzt werden.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die Idee einer Verstromung druckindizierter Luftströmungen in einem Tunnel mit ausschließlicher Längslüftung beim Großteil der Straßentunnel nicht sinnvoll umsetzbar erscheint. Bei hohen Vertikalschächten, die ausschließlich im Brandfall genutzt werden, ist das theoretische Potenzial zur Nutzung der Auftriebsströmungen merklich höher. Will man diesen Pfad weiterverfolgen, wäre eine vertiefende strömungstechnische Untersuchung unter Einbeziehung realer Luftwege von Tunnelfahrraum bis Schachtaustritt sowie über die notwendigen baulichen und maschinentechnischen Einrichtungen – inklusive einer Betrachtung sicherheitstechnischer Aspekte – im Rahmen einer konkreten Pilotuntersuchung notwendig.

## Abstract

Within the framework of the research project “Tunnelkraftwerk” (funding programme Mobility of the Future MdZ-VIT, FFG project 893655), possibilities for the utilization of meteorologically or thermally caused air flows in road tunnels for electricity production were investigated.

In a first step, a potential analysis was carried out for standard tunnels (2-lane cross-section) with different lengths and meteorological pressure differences. In a second step, the driving pressure differences between portals and across vertical shafts were determined for Austrian tunnels and the possible annual electricity production was calculated for selected tunnels.

The calculation of the annual electricity production was based on real prevailing pressure differences in tunnel systems in the Austrian motorway and motorway network. On the basis of the available measurement data, such tunnel facilities were selected for further consideration that have a reasonable meteorologically induced pressure difference. Taking into account the aerodynamic conditions as well as the expected efficiencies in electricity generation, an expected annual energy quantity can be estimated.

In summary, the idea of producing electricity from pressure-induced air flows in a tunnel with purely longitudinal airflow does not seem to make economic sense for the majority of road tunnels in Austria. For high vertical shafts that are used exclusively in case of fire, the theoretical potential for using uplift currents is much higher. If this path is to be pursued further, a more in-depth investigation including real airways from the tunnel to the shaft exit as well as the necessary structural and mechanical equipment - including consideration of safety aspects - would be required as part of a concrete pilot investigation.

## Inhalt

1	Einleitung.....	11
2	Theoretische Betrachtung des energetischen Potenzials zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Luftströmungen in Tunnelanlagen .....	11
2.1	Allgemein.....	11
2.2	Mathematische Beschreibung der Strömung in einem Tunnel oder Schacht.....	12
2.3	Theoretisch maximal mögliche Turbinenleistung .....	13
2.4	Theoretisch maximal erzielbare Leistung in Straßentunneln als Funktion von Druckdifferenzen und Tunnellänge, Parameterstudie für Referenz-tunnel .....	14
3	Meteorologisch bedingte Druckdifferenzen bei österreichischen Tunnelanlagen.....	16
3.1	Allgemein.....	16
3.2	Datenbasis .....	16
4	Auswertung der meteorologischen Druckdifferenzen .....	18
4.1	Längsgelüftete Tunnel .....	19
4.1.1	Oberösterreichisches Alpenvorland .....	19
4.1.2	Steiermark Packabschnitt .....	20
4.1.3	Steiermark Mürztal.....	21
4.1.4	Steiermark Raum Graz Nord .....	21
4.1.5	Kärnten A10 .....	22
4.1.6	Zusammenfassung längsgelüfteter Tunnel .....	23
4.2	Alpenquerende Tunnel (Querlüftung).....	23
4.2.1	Portaldruckdifferenzen .....	23
4.2.2	Schachtauftrieb.....	24
5	Notwendige elektrotechnische Ausstattung.....	26
5.1	Elektromechanische Energieumwandlung .....	26
5.2	Bestand .....	28



5.2.1	Abluftventilatoren .....	28
5.2.2	Strahlventilatoren .....	28
6	Abschätzung des Potenzials zur Erzeugung elektrischer Arbeit aus den Portaldruckdifferenzen .....	29
6.1	Potenzial der Portaldruckdifferenzen .....	29
6.2	Abschätzung von Jahresenergiemengen aus den Portaldruckdifferenzen (Nutzung einer Längsströmung) .....	32
6.2.1	Theoretisch aus den Portaldruckdifferenzen zur Verfügung stehende Jahresenergiemenge (aerodynamischer Anteil) .....	32
6.2.2	Reale (verlustbehaftete) aus den Portaldruckdifferenzen zur Verfügung stehende Jahresenergiemenge .....	36
6.3	Potenzial des Schachtauftriebes .....	38
6.4	Abschätzung von Jahresenergien aus den Auftriebsströmungen .....	40
6.4.1	Randbedingungen .....	40
6.4.2	Abschätzung der Jahresenergiemenge .....	41
7	Wirkungsgradabschätzung der Elektrischen Maschinen .....	43
8	Notwendige bauliche und operative Maßnahmen .....	51
9	Zusammenfassung .....	52
9.1	Grundlegende Bemerkungen .....	52
9.2	Generierbare Jahresenergiemenge .....	53
9.2.1	Längsgelüftete Tunnel (ausschließlich Strahlventilatoren) .....	53
9.2.2	Tunnel mit durchgehendem Luftkanal (Halbquerlüftung) und Nutzung der Längsgeschwindigkeit .....	54
9.2.3	Tunnel mit Querlüftung, Nutzung der Schachtströmungen .....	55
9.3	Resümee .....	56
10	Verzeichnisse .....	60
10.1	Literaturverzeichnis .....	60
10.2	Abbildungsverzeichnis .....	60

10.3 Tabellenverzeichnis .....61

## **1 EINLEITUNG**

Im Rahmen des Forschungsprojektes Tunnelkraftwerk (Förderprogramm Mobilität der Zukunft MdZ-VIT, FFG Projekt 893655) soll die Möglichkeit von Stromerzeugung aus meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln erkundet werden.

Gemäß Ausschreibungsunterlagen sind Parameterstudien in Bezug auf Luftgeschwindigkeiten in Straßentunneln und Luftschächten durchzuführen. Nicht definiert wurden die Rahmenbedingungen, die zu diesen Längsgeschwindigkeiten der Luft im Tunnel bzw. Schacht führen. Nachdem nun jedoch der Wert der Längsgeschwindigkeit in einem Kanal (Tunnel bzw. Schacht) von vielen Faktoren abhängt, wurde die Fragestellung im Rahmen des Projektes unter Einbindung der Vertreter:innen der Auftraggeber so präzisiert, dass in einem ersten Schritt eine Potenzialanalyse für Standardtunnel (2-streifiger Querschnitt) mit unterschiedlichen Längen und meteorologischen Druckdifferenzen durchgeführt wurde. In einem zweiten Schritt wurden dann für österreichische Tunnelanlagen die treibenden Druckdifferenzen zwischen Portalen bzw. über Schächte erhoben und für ausgewählte Anlagen die mögliche nutzbare Jahresenergie berechnet.

## **2 THEORETISCHE BETRACHTUNG DES ENERGETISCHEN POTENZIALS ZUR ERZEUGUNG VON ELEKTRISCHER ENERGIE AUS LUFTSTRÖMUNGEN IN TUNNELANLAGEN**

### **2.1 Allgemein**

Luftströmungen in Tunnelanlagen treten aufgrund von Druckdifferenzen zwischen den beiden Portalen auf. Diese Druckdifferenzen sind meteorologisch bedingt. Zu einem bestimmten Maße tragen auch die Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Tunnelinnerem zu einer Entwicklung einer Luftströmung bei. Strömungen, die durch den Schub der Fahrzeuge im Tunnel generiert werden, werden in weiterer Folge nicht betrachtet, da diese durch den Fahrzeugantrieb erzeugt werden. Jegliche „Nutzung“ dieses Anteiles wäre somit nur ein Transfer von einer Energiequelle zu einer anderen.

Bei hohen Vertikalschächten, wie sie z.B. bei quergelüfteten Tunnelanlagen zu finden sind, treten thermisch bedingte Auftriebsströmungen auf, die zusätzlich auch noch von unterschiedlichen barometrischen Drücken überlagert werden können.

## 2.2 Mathematische Beschreibung der Strömung in einem Tunnel oder Schacht

Grundsätzlich handelt es sich bei Strömungsvorgängen von Luft mit höheren Geschwindigkeiten um turbulente Strömungen. Derartige Strömungen sind in der Regel dreidimensional. Bei Tunnelanlagen kann jedoch aufgrund der sehr hohen Längenerstreckung von einer Kanalströmung mit eindimensionalem Charakter ausgegangen werden. Für derartige Strömungen eignet sich die erweiterte Form der Bernoulli-Gleichung. Die Bernoulli-Gleichung gilt für eine inkompressible, reibungsfreie Strömung oder richtigerweise für einen Stromfaden. Um die Reibung und andere Widerstände zu berücksichtigen, erfolgt eine Erweiterung, bei der diese Verluste durch Kennzahlen mit quadratischer Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Für einen Kanal/Tunnel mit gleichbleibendem Querschnitt stellt sich die erweiterte Bernoulli-Gleichung wie folgt dar:

$$\Delta p_{ges} = (\zeta_E + 1) * \frac{\rho}{2} * u_V^2 + \lambda * \frac{l}{D} * \frac{\rho}{2} * u_V^2 + \Delta p_F + \Delta p_T + \Delta p_{Turb}$$

Gleichung 1

Die einzelnen Parameter der Gleichung werden im Folgenden erläutert:

- $\Delta p_{ges}$ : Druckdifferenz zwischen den beiden Tunnelportalen, höhenkorrigiert
- $\zeta_E$ : Eintrittsverlustbeiwert in das Portal, der Wert eins steht für die Berücksichtigung des Verlustes der kinetischen Energie am Austritt
- $\rho$ : Luftdichte
- $u_V$ : Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel (oder Schacht)
- $\lambda$ : Wandreibungsbeiwert
- $l$ : Länge des Tunnels in Meter
- $D$ : Hydraulischer Durchmesser des Tunnels in Meter
- $\Delta p_F$ : Druckänderung durch fahrende Fahrzeuge (kann positiv oder negativ sein)
- $\Delta p_T$ : Thermostatische Kräfte bei Tunneln mit Längsneigung
- $\Delta p_{Turb}$ : Druckreduktion durch Turbine bei Generatorbetrieb

Thermisch bedingte Druckunterschiede können sich aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen zwischen Portal und Tunnelinnerem einstellen. Sie lassen sich näherungsweise wie folgt beschreiben:

$$\Delta p_T = \Delta H * \rho * g * \frac{T_V - T_0}{T_V}$$

Gleichung 2

Hierbei ist  $\Delta H$  der Höhenunterschied zwischen den Portalen,  $\rho$  die Luftdichte außerhalb des Tunnels,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $T_V$  die mittlere Temperatur im Verkehrsraum und  $T_0$  die absolute Temperatur der Außenluft am Portal der Lufteinströmung.

Während thermisch bedingte Druckunterschiede bei Tunnelanlagen aufgrund der i.A. relativ geringen Längsneigung bei den hier angestellten Betrachtungen wenig relevant sind, ist dies bei hohen Lotschächten sehr wohl der Fall. Hier wirken die Temperaturunterschiede zwischen Schachtfuß und Schachtkopf als treibende Kräfte. Unter Vernachlässigung eines etwaigen Wärmeflusses über die Schachtwände zwischen dem umgebenden Gestein und der strömenden Luft kann man von einem nahezu isothermen Verhalten der Luftsäule ausgehen. Somit bleibt Gleichung 2 prinzipiell gleich. Als treibende Kraft ist nun die Differenz zwischen Temperatur Innen (= Schachtfuß) und Außen (= Umgebung Schachtkopf) anzusetzen. Dafür sind nun die anderen Einflussgrößen wie Wandreibung in Relation gesehen klein.

### 2.3 Theoretisch maximal mögliche Turbinenleistung

Die technische Arbeit bzw. die Leistung einer Maschine lässt sich unter Vernachlässigung von Reibungsarbeit sowie Änderungen der äußeren Energien (kinetische, potenzielle Energie usw.) gemäß 1. Hauptsatz der Thermodynamik und der Annahme einer konstanten Dichte wie folgt berechnen:

$$P_{Turb} = \dot{m} * \int_1^2 v dp = \dot{V} * \int_1^2 dp = A * u_V * (p_2 - p_1) = -A * u_V * \Delta p_{Turb}$$

Gleichung 3

Der Volumenstrom ergibt sich aus der Multiplikation des Tunnelquerschnitts ( $A$ ) mal der durchschnittlichen Geschwindigkeit in Tunnelfahrraum ( $u_V$ ). Da die von der Turbine genutzte Druckdifferenz im Tunnel quadratisch zur Luftgeschwindigkeit steht, ergibt sich somit eine kubische Abhängigkeit der Leistung von der Luftgeschwindigkeit.

Auf Basis einer Maximalwertbetrachtung kann die optimale Luftgeschwindigkeit ermittelt werden, bei der sich eine maximale Leistungsausbeute (theoretisch) ergibt.

$$P_{T\_opt} = A \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta p^3_{ges}}{k_{Tunnel}}}$$

Gleichung 4

Dabei repräsentieren  $k_{Tunnel}$  den mit  $\frac{\rho}{2}$  multiplizierten Tunnelwiderstand und A den Tunnelquerschnitt.

## 2.4 Theoretisch maximal erzielbare Leistung in Straßentunneln als Funktion von Druckdifferenzen und Tunnellänge, Parameterstudie für Referenztunnel

Wie aus Gleichung 4 ersichtlich, ist die theoretisch erzielbare Turbinenleistung abhängig von Parametern wie Tunnellänge, Querschnittsfläche, Wandrauigkeit und Eintrittsverlust. Um nun eine Abschätzung über die erzielbare Turbinenleistung zu machen, müssen daher einige Parameter festgelegt werden. Beispielhaft werden folgende Parameter definiert:

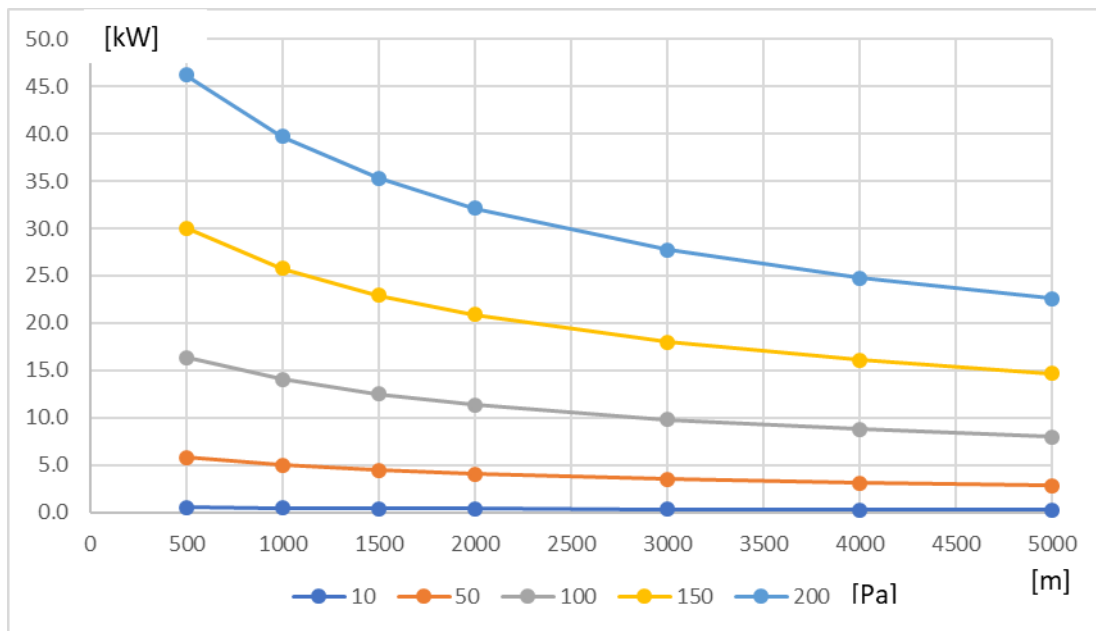
Parameter	Einheit	Wert
Tunnellänge	m	variabel in 500 m Schritten
Tunnelquerschnitt	m <sup>2</sup>	55
Widerstandsbeiwert Portal	-	0.85
Wandrauigkeit	-	0,016
Luftdichte	kg/m <sup>3</sup>	1,1715
Wirkungsgrad Turbine	-	0,70
Druckdifferenz zwischen Portalen	Pa	variabel

**Tabelle 1: Für die Studie verwendete Parameter für die aerodynamische Betrachtung des Tunnels**

Basierend auf den in Tabelle 1 angeführten Eingangsparametern lassen sich als Funktion der Tunnellänge und der zwischen den Portalen wirkenden Druckdifferenz aerodynamisch folgende Leistungen generieren (Anmerkung: mechanische Wirkungsgrade sowie Verluste generatorseitig sind hier nicht berücksichtigt). Etwaige thermisch bedingte Einflüsse innerhalb des Tunnels (Auf- bzw. Abtrieb) werden bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. Positiv wirkende Druckänderungen durch fahrende Fahrzeuge werden in

weiterer Folge aus oben genannten Gründen ebenfalls nicht berücksichtigt. Durch Fahrzeuge hervorgerufene negativ wirkende Druckänderungen (Stau oder Fahrtrichtung entgegen die natürliche Strömungsrichtung) werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da in einem ersten Schritt das maximale Potenzial einer möglichen Energieumwandlung abgeschätzt werden soll.

Abbildung 1 zeigt die aus der Kombination von Druckdifferenzen und Tunnellänge erzielbare Nutzenergie.



**Abbildung 1: Theoretisch erzielbare Turbinenleistung als Funktion der Druckdifferenz und der Tunnellänge**

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, sind höhere Leistungen nur bei der Kombination von kurzer Tunnellänge und hohen Druckdifferenzen erreichbar. Dies steht natürlich diametral den realen Bedingungen entgegen, da in der Regel bei kurzen Tunneln die Druckdifferenzen zwischen den Portalen eher gering ausfallen.

### **3 METEOROLOGISCH BEDINGTE DRUCKDIFFERENZEN BEI ÖSTERREICHISCHEN TUNNELANLAGEN**

Inhalt dieses Kapitels ist die Analyse meteorologischer Parameter in Form von Druckdifferenzen zwischen den Portalen und Winddrücken an den Portalen.

#### **3.1 Allgemein**

Prinzipiell werden die beiden Parameter „barometrischer Luftdruck“ (statischer Druck) und „Winddruck“ (dynamischer Druck) unterschieden. Windgeschwindigkeiten (bzw. der dynamische Druck) können prinzipiell mit einer höheren Genauigkeit als der Absolutdruck (statischer Druck) bzw. die daraus resultierende Druckdifferenz zwischen den beiden Portalen gemessen werden.

Zu beachten ist, dass abhängig von der örtlichen Lage der Messstellen und den Messbedingungen beide Parameter miteinander verknüpft sein können. So wirkt sich bei gemeinsamer Lage von Tunnelportalen im gleichen klimatologischen Raum (z.B. im gleichen Tal oder in Becken) eine barometrische Druckdifferenz automatisch als Wind aus. Eine Addition dieser beiden Komponenten würde in einem derartigen Fall automatisch zu einer Doppelbewertung führen. Eine gleichzeitige Berücksichtigung beider Drücke ist daher nur dann sinnvoll, wenn entkoppelte meteorologische Situationen an den beiden Portalen vorliegen, wie dies z.B. bei Tunneln im Bereich größerer Alpenquerungen (meist kombiniert mit hohen Überdeckungen) der Fall ist. Bei portalnahen Messungen bei gleichzeitig örtlich und räumlich getrennter Erfassung der Parameter Wind und barometrischer Druck ist zudem auch zu achten, wie und wo die barometrischen Drücke erfasst werden. Eine Addition der beiden Komponenten statischer und dynamischer Druck ist nur dann zielführend, wenn auch beide am gleichen Messort ermittelt werden. Ist der Messgeber so situiert, dass der dynamische Druck (Wind) bereits in eine Staudruckkomponente umgewandelt wurde, so ist die dynamische Komponente nicht mehr zu berücksichtigen.

#### **3.2 Datenbasis**

Im Rahmen von Tunnelbau- und Sanierungsprojekten werden seitens der ASFINAG immer wieder meteorologische Messungen an Tunnelstrecken im Bereich des Autobahnnetzes durchgeführt. Diese Messungen umfassen in der Regel eine Periode von einem Jahr (365 Tage) und betreffen die üblichen meteorologischen Parameter wie Absolutdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtungsverteilungen.



Nachdem in der Regel die beiden Portale von Tunneln ohne zusätzliche Zu- bzw. Abfahrten auf einer unterschiedlichen Seehöhe liegen, müssen die gemessenen Daten des jeweiligen Absolutdrucks betreffend Seehöhe des Messensors gem. ISO Standardatmosphäre (ISO 2533) korrigiert werden. Dies kann auf unterschiedliche Art erfolgen. Das Planungshandbuch der ASFINAG sieht eine einheitliche Vorgangsweise vor, die auf einer ausschließlichen Berücksichtigung der Höhendifferenz zwischen den Sensoren bei den beiden Portalen sowie der gemittelten Temperatur zwischen den Portalen beruht (ASFINAG, 2013). Tabelle 2 enthält eine Auflistung von Tunnelanlagen, bei denen qualitätsgesicherte Daten über Portaldruckdifferenzen vorliegen. Die Messungen wurden alle im Auftragsbereich der ASFINAG durchgeführt und für eine weitere Auswertung im Rahmen dieses Projektes herangezogen.

<b>Autobahn/- Schnellstraße</b>	<b>Bundesland</b>	<b>Tunnelkette</b>	<b>Tunnel</b>	<b>Messzeitraum</b>
S6 Semmering Schnellstraße	Steiermark	TK Semmering	Semmering	19.11.2019 - 19.11.2020
			Steinhaus	19.11.2019 - 19.11.2020
			Spital	19.11.2019 - 19.11.2020
			Ganzstein	19.11.2019 - 19.11.2020
A2 Südatautobahn	Steiermark	TK Pack	Herzogberg	28.11.2019 - 30.11.2020
			Mitterberg	28.11.2019 - 30.11.2020
			Kalcherkogel	28.11.2019 - 30.11.2020
A9 Pyhrnautobahn	Steiermark	TK Gratkorn	Gratkorn I	01.12.2019 - 01.01.2021
			Gratkorn II	01.12.2019 - 01.01.2021
A9 Pyhrnautobahn	Oberöster- reich	TK Kremsur- sprung	Kremsur- sprung	15.01.2020 - 18.01.2021
			Ottsdorf	15.01.2020 - 18.01.2021
			Kienberg	ausstehend
			Hungerbichl	ausstehend
S6 Semmering Schnellstraße	Steiermark	-	Tanzenberg	08.04.2021 - 13.04.2022
A10 Tauernautobahn	Kärnten	-	Trebesing	16.12.2020 - 17.12.2021
A10 Tauernautobahn	Kärnten	-	Oswaldiberg	01.07.2013 - 01.07.2014

Autobahn/ Schnellstraße	Bundesland	Tunnelkette	Tunnel	Messzeitraum
A10 Tauernautobahn	Kärnten	-	Oswaldiberg	01.07.2013 - 01.07.2014
A12 Inntalautobahn	Tirol	-	Mils	13.08.2015 - 22.08.2016
S35 Brucker Schnellstraße	Steiermark	TK Bruck	Kaltenbach	27.07.2022 - laufend
			Kirchdorf	27.07.2022 - laufend
S6 Semmering Schnellstraße	Steiermark	-	Niklasdorf	13.07.2022 - laufend
A9 Pyhrnautobahn	Steiermark	-	Gleinalm	15.09.2010 - 30.09.2011
A9 Pyhrnautobahn	Oberöster- reich		TK-Klaus	01.01.2012 – 31.12.2012
A10 Tauernautobahn	Kärnten		Tauern- tunnel	14.10.2008 - 12.10.2009
S16 Arlbergschnell- straße	Vorarlberg/- Tirol		Arlberg- tunnel	9.2.2011-13.2.2012 (Albona Schacht)
A9 Pyhrnautobahn	Steiermark		Gleinalm- tunnel	Schachtmessung 01.10. – 31.12. 2010
A11 Karawanken- autobahn	Kärnten/- Slowenien		Karawanken- tunnel	10.3.2009 – 4.5 2010
A9 Pyhrnautobahn	Steiermark		Plabutsch- tunnel	2017: Portaldruckdifferenzen 1.10. 2022 – 31.03. 2023 Schachtmessungen

**Tabelle 2: Auflistung der Tunnelanlagen mit auswertbaren Daten zu meteorologischen Druckdifferenzen**

## 4 AUSWERTUNG DER METEOROLOGISCHEN DRUCKDIFFERENZEN

Die Auswertung dieser Daten erfolgt nach mehr oder weniger regionalen Gesichtspunkten, die den Tunnelcharakter im Sinne regionaler meteorologischer Bedingungen widerspiegeln sollen. Getrennt davon sind die großen alpenquerenden quergelüfteten Tunnel zu sehen, da bei diesen meist Gebiete mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen miteinander verbunden werden.

Ausgewertet wurden die meteorologischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen sowie bei einigen ausgewählten quergelüfteten Tunnel auch der Schachtauftrieb. Die

Auswertungen bedienen sich jener Daten, die in den Messberichten zu den jeweiligen Tunnelanlagen zur Verfügung standen. Nur bei jenen Tunnelanlagen, bei denen eine höhere meteorologische Druckdifferenz festgestellt wurde und eine ausreichende Datenbasis vorhanden war, erfolgten weiterführende Analysen.

Von den meisten der oben angeführten Tunnelanlagen (Tabelle 2) sind für die Lüftungstechnischen Dimensionierungen die 95- und/oder 98- Perzentilwerte bekannt. Die folgende Analyse bezieht sich daher auf diese Daten.

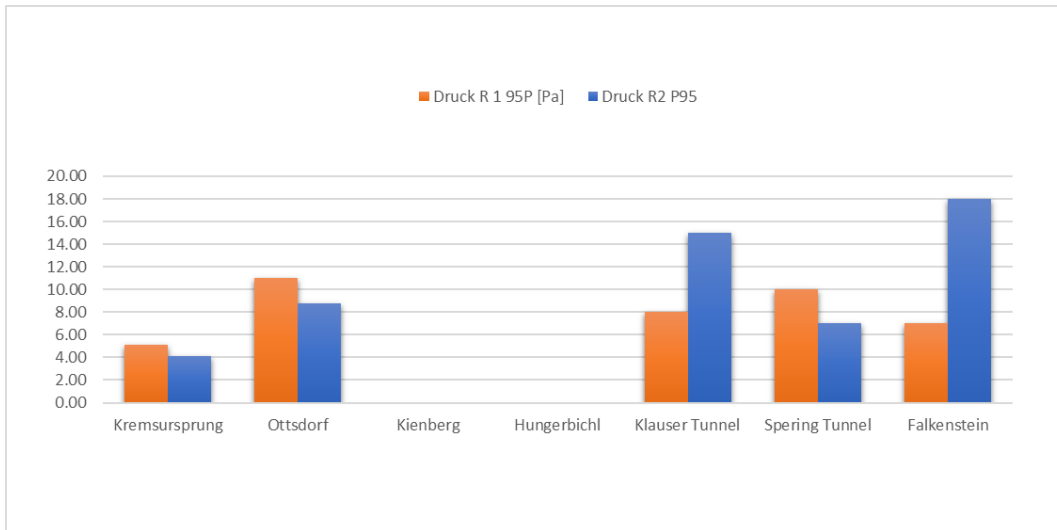
## **4.1 Längsgelüftete Tunnel**

### **4.1.1 Oberösterreichisches Alpenvorland**

Im OÖ Alpenvorland befinden sich entlang der A9 Pyhrnautobahn längsgelüftete Tunnelanlagen. Diese sind fast alle in N-S Richtung ausgerichtet. Die Tunnel des Bereiches Micheldorf (Kremsursprung, Ottsdorf und Kienberg) sind talparallel im Bereich des Kremstals. Zusätzliche statische Druckdifferenzen sind hier nicht zu erwarten, da jegliche Druckdifferenz sich als Wind widerspiegelt und somit in den dynamischen Druckdifferenzen enthalten sind.

Für die Tunnelkette Klaus liegen Daten zu den Tunneln Klaus, Spering und Falkenstein vor. Auch diese Tunnel sind sogenannte Lehnentunnel, d.h. bergmännische Tunnel, die parallel zum Berghang in relativer Nähe zur Geländeoberfläche verlaufen. Somit sind auch hier ausschließlich dynamische Winddrücke zu berücksichtigen.

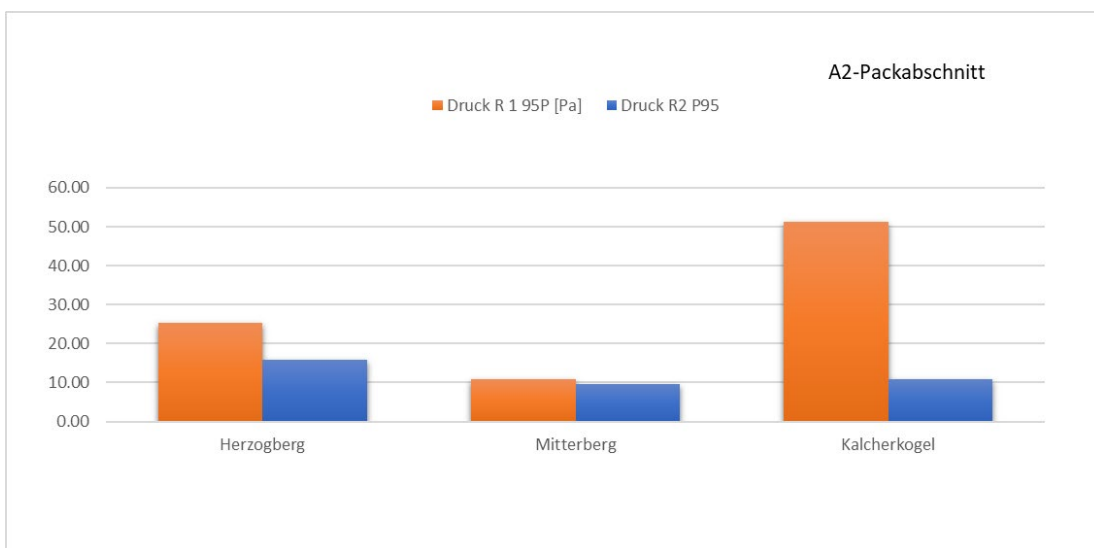
Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, beträgt das 95-Perzentil der Druckdifferenzen (hier ausschließlich dynamischer Druck) zwischen 4 und 18 Pa.



**Abbildung 2: dynamische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A9 im OÖ Alpenvorland, R1 = N-S, R2 = S-N Richtung**

#### 4.1.2 Steiermark Packabschnitt

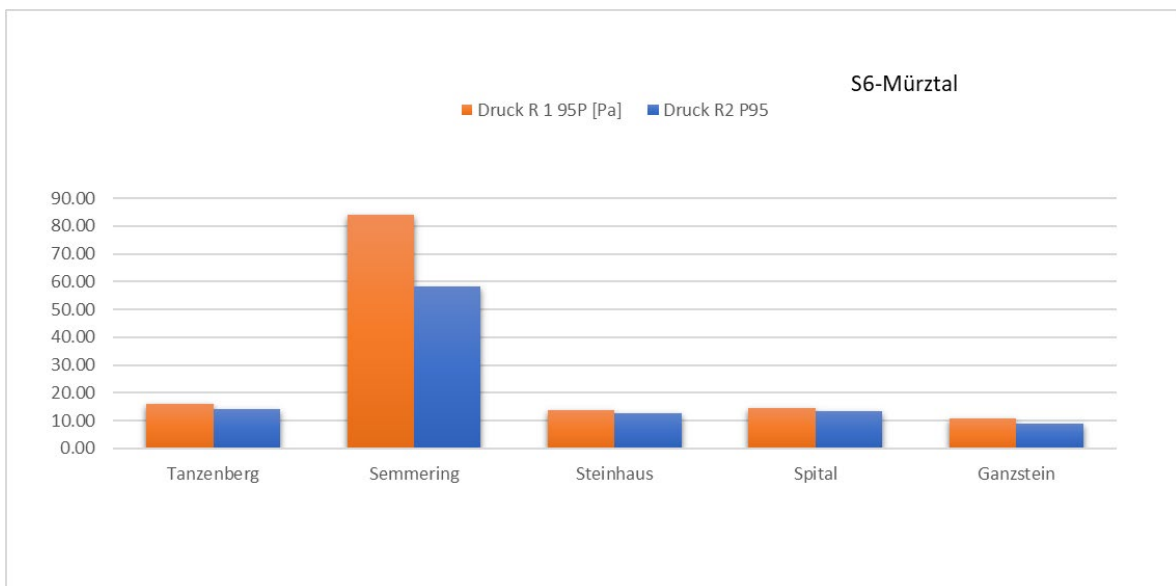
Im Bereich der A2 im Packabschnitt liegen Daten für die Tunnel Herzogberg, Mitterberg und Kalcherkogel (Westportal in Kärnten) vor. Die generelle Ausrichtung ist hier W-O und liegt somit im Bereich der Hauptwindrichtungen. Die Auswertungen der barometrischen Druckdifferenzen liegen zwischen 10 Pa und 50 Pa. Anzumerken ist, dass bei den niedrigen Druckdifferenzen bereits die Messungenauigkeit eine große Rolle spielt. Betrachtet man die dynamischen Drücke alleine, so würden die Druckdifferenzen um eine 10er-Potenz niedriger ausfallen.



**Abbildung 3: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A2 im Packabschnitt, R1 = W-O, R2 = O-W Richtung**

### 4.1.3 Steiermark Mürztal

Im Bereich des Mürztales liegt entlang der S6 die Tunnelkette Semmering. Die Tunnel sind talparallel und liegen mit Ausnahme des Tunnels Semmering im selben Tal mit W-O Ausrichtung. Die unterschiedlichen Höhenlagen der Portale machen sich aufgrund der unterschiedlichen thermischen Bedingungen (vor allem im Winter) bei den Tunneln Steinhaus und Spital bemerkbar. Der Tunnel Semmering nimmt aufgrund der Passsituation eine Sonderstellung ein. Hier treten relativ hohe barometrische Druckdifferenzen zutage. Ebenfalls eine Sonderstellung nimmt der Tanzenbergtunnel bei Kapfenberg bzw. Bruck/Mur ein, da er das Mürztal mit dem Murtal verbindet. Hier ist die Portalausrichtung ONO bei Kapfenberg bzw. SW bei Bruck/Mur. Trotz dieser Verbindung zwischen den beiden Tälern sind die gemessenen Druckunterschiede relativ gering. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, schwanken die 95 Perzentilwerte der barometrischen Drücke zwischen 10 Pa (Messgenauigkeit) und 80 Pa. Dynamische Drücke liegen im 95 Perzentil ebenfalls um eine 10er Potenz niedriger.

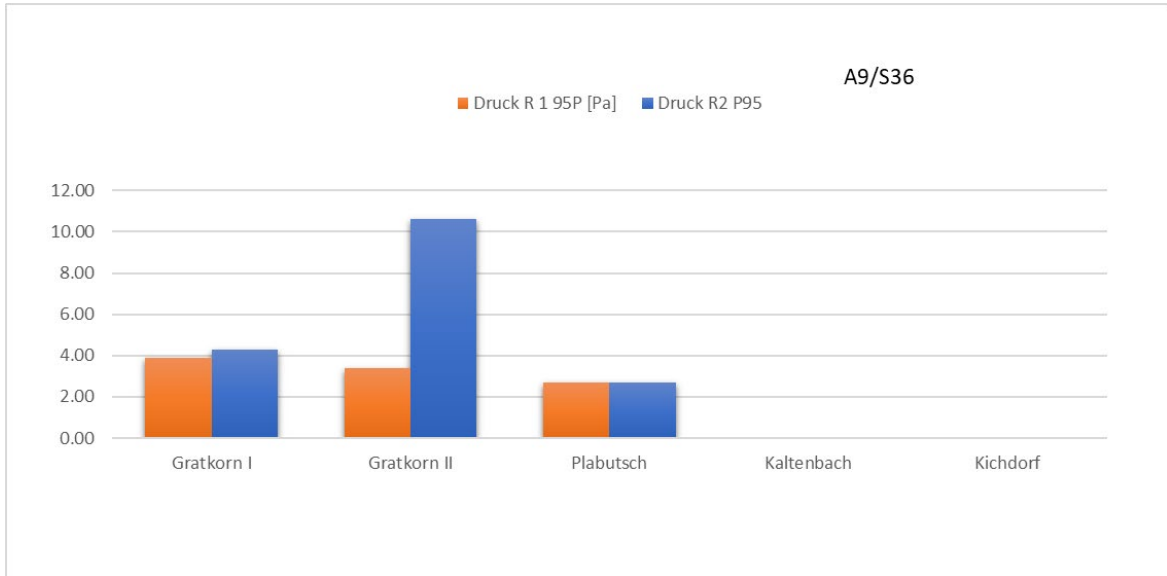


**Abbildung 4: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der S6 im Mürztal, R1 = W-O, R2 = O-W Richtung – Ausnahme Tanzenbergtunnel R1 = S-N, R2 = N-S**

### 4.1.4 Steiermark Raum Graz Nord

Im Bereich des Murtales zwischen Bruck/Mur und Graz sowie beim Plabutschunnel treten barometrische Druckdifferenzen im Bereich < 10 Pa als 95 Perzentil auf. Dargestellt sind

ausschließlich dynamische Drücke, beim Plabutschtunnel sind im 95 Perzentil noch ca. 20 Pa (beide Richtungen zusammen<sup>1</sup>) zu veranschlagen.

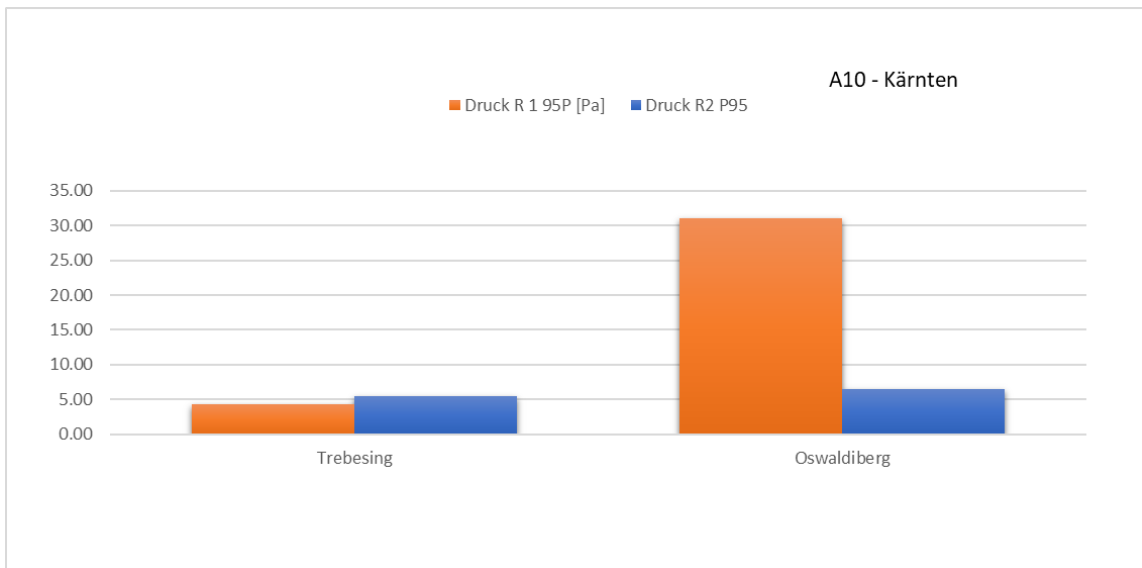


**Abbildung 5: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der S36 im Murtal und der A9 im Raum Graz, R1 = N-S, R2 = S-N**

#### 4.1.5 Kärnten A10

Für Kärnten liegen derzeit nur für den Oswaldibergtunnel bei Villach sowie die Einhausung Trebesing meteorologische Daten vor. Während sich bei Trebesing jegliche statische Druckdifferenz als Wind (dynamische Drücke) widerspiegelt, ist die Situation beim Oswaldibergtunnel (statische und dynamische Drücke) etwas komplexer.

<sup>1</sup> Für eine genaue Auswertung liegen die Daten leider nicht in der dafür notwendigen Detailierung vor



**Abbildung 6: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A10 in Kärnten, Trebesing: R1 = S-N, R2 = N-S Richtung; Oswaldiberg: R1 = W-O, R2 = O-W Richtung**

#### 4.1.6 Zusammenfassung längsgelüfteter Tunnel

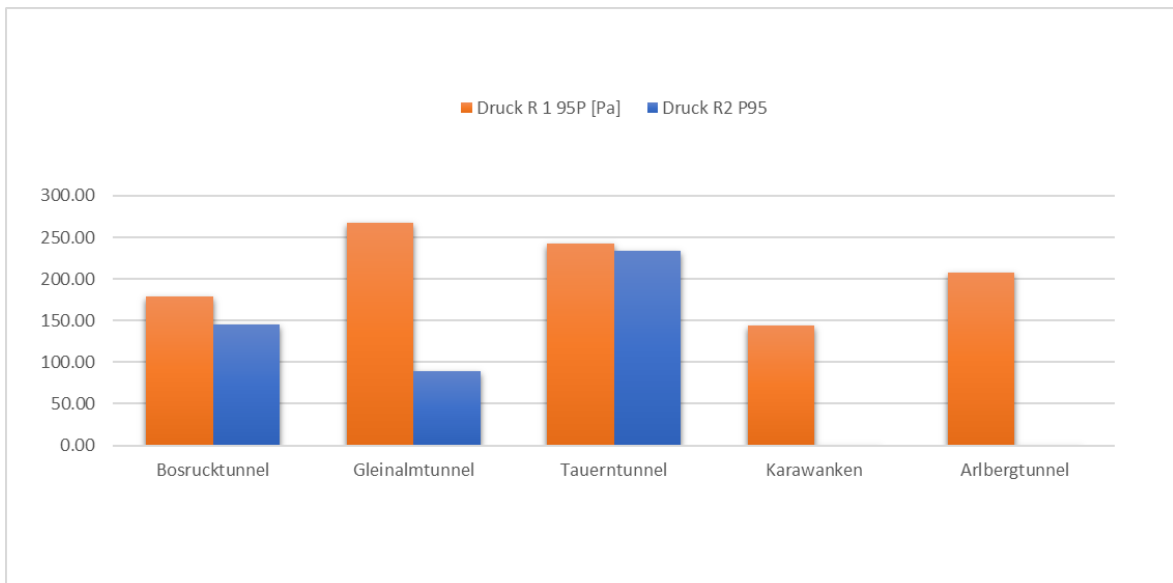
Betrachtet man die oben angeführten Tunnelanlagen, so kann geschlossen werden, dass die auf die Tunnelportale wirkenden Druckdifferenzen in der Regel sehr klein, d.h. bereits im 95 Perzentil < 20 Pa sind. Höhere Druckdifferenzen sind nur beim Semmering Tunnel mit 84 Pa in W-O Richtung im 95 Perzentil und im Kalcherkogel Tunnel auf der A2 im Packabschnitt mit ca. 50 Pa im 95 Perzentil zu verzeichnen.

## 4.2 Alpenquerende Tunnel (Querlüftung)

Alpenquerende Tunnel sind in der Regel mit einer Querlüftung ausgestattet. Relevante meteorologische Druckdifferenzen sind bei den großen Alpen Tunneln zu erwarten.

### 4.2.1 Portaldruckdifferenzen

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich, treten bei den langen Tunneln mit hoher Überdeckung, wie Tauern-, Gleinalm und Arlbergtunnel, barometrische Druckdifferenzen im Bereich größer 200 Pa als 95 Perzentil auf.



**Abbildung 7: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen Alpen-querender Tunnel; R1 = S-N, R2 = N-S Richtung; Ausnahme Karawanken- und Arlbergtunnel: keine getrennte Betrachtung der Richtungen**

#### 4.2.2 Schachtauftrieb

Bei quergelüfteten Tunneln treten zusätzlich Auftriebskräfte in den Vertikalschächten auf.

Arlbergtunnel: Am ausgeprägtesten treten Auftriebskräfte am Albona Schacht mit einer Schachthöhe von 778 m auf. Für diesen Schacht wurden während einer Messkampagne vom Februar 2011 bis Februar 2012 an der Absperrklappe der Axialventilatoren 370 Pa als 95 Perzentil festgestellt. Anzumerken ist dabei jedoch, dass beim Arlbergtunnel zu 66% eines Jahres die Lüftung aufgrund des Betriebes zur Aufrechterhaltung der notwendigen Luftgüte im Tunnel benötigt wird. Die angeführten Perzentilangaben beschränken sich daher auf jenen Zeitraum, während dem die Lüfter nicht in Betrieb waren. Somit steht für die Nutzung des Auftriebes zur Stromerzeugung nur ein beschränkter Zeitraum zur Verfügung.

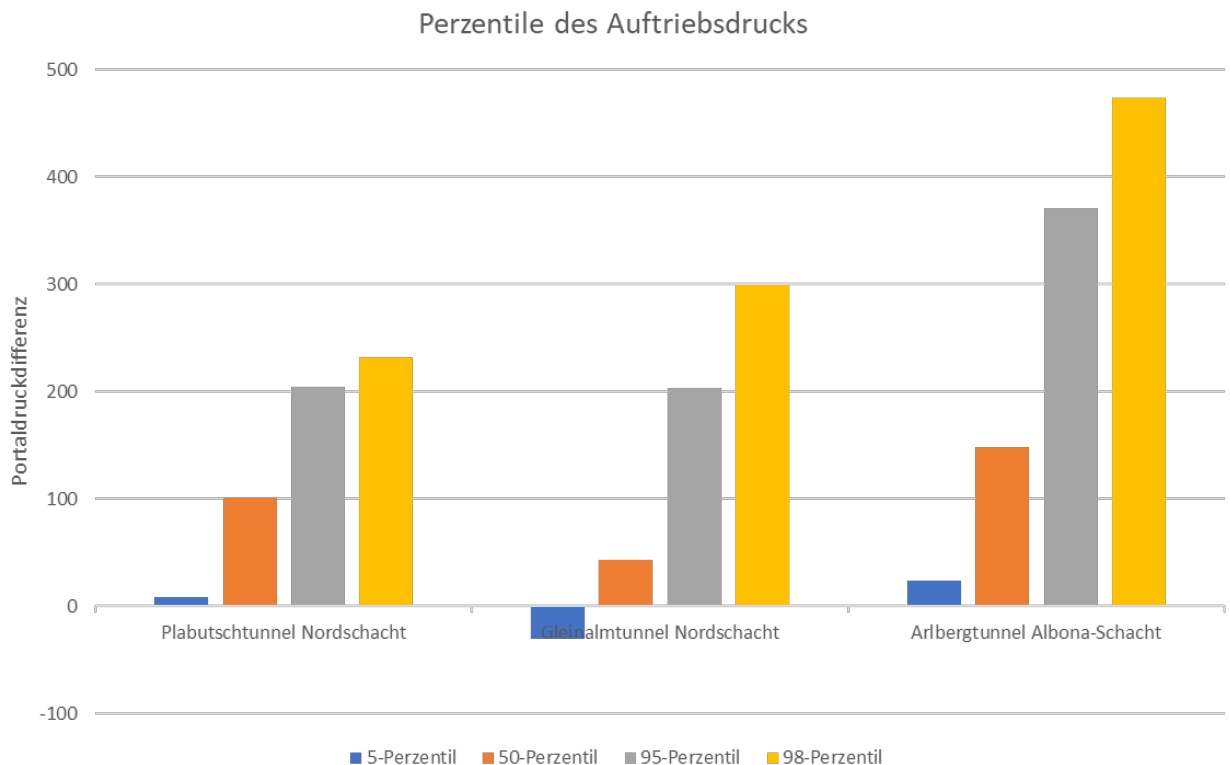
Gleinalmtunnel: Für einen beschränkten Zeitraum von einem Winterhalbjahr (Oktober 2009 bis Februar 2010) liegen auch für den 366 m hohen Nordschacht des Gleinalmtunnels Auftriebsmessungen vor. Das 95 Perzentil der Druckdifferenzen ergab sich zu 203 Pa und das 98 Perzentil zu knapp 300 Pa. Bei diesen beiden Werten muss aber angeführt werden, dass aufgrund des während des Zeitraums der Messungen notwendigen Betriebes der Lüftung zu sehr hohen Zeitanteilen keine Daten vorliegen (druckseitige Ventilatorabsperrklappe ist bei diesen Betriebszuständen geöffnet). Somit sind diese



Datensätze für weiterführende Berechnungen in Bezug auf nutzbare Jahresenergie nur eingeschränkt auswertbar.

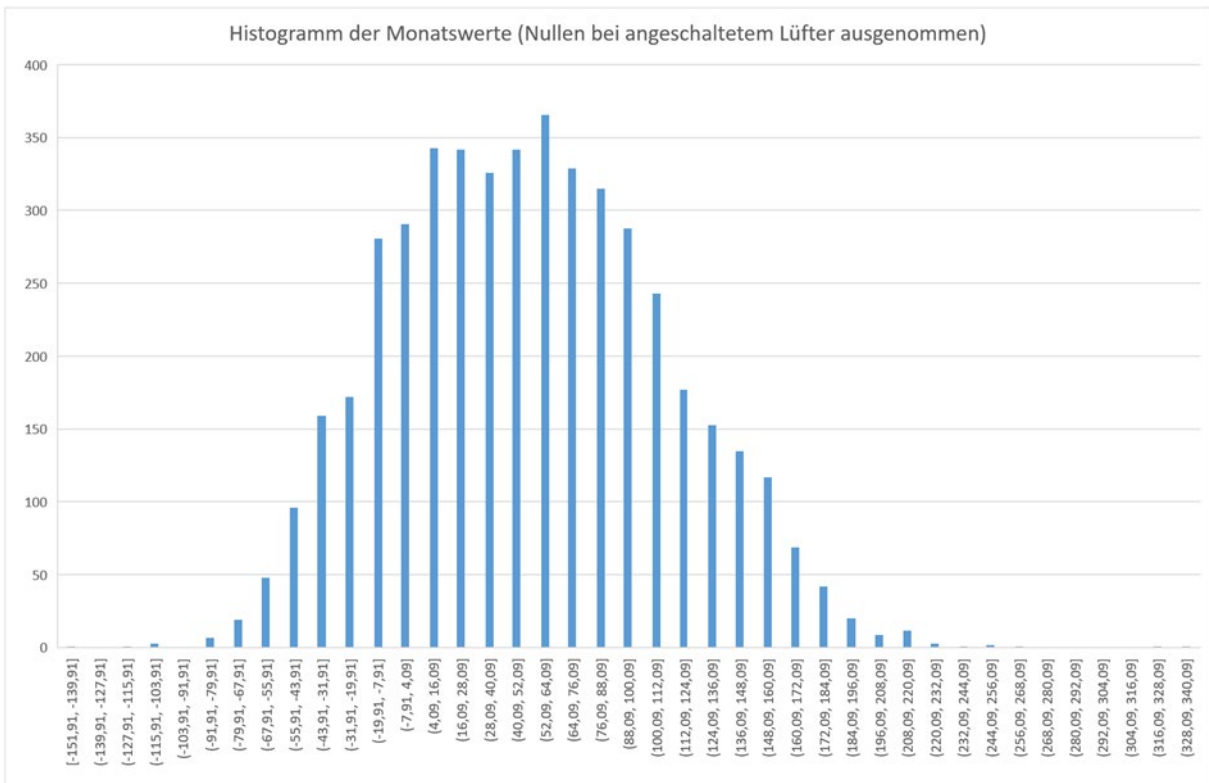
Tauerntunnel: Für den Tauerntunnel wurden ebenfalls Schachtauftriebsmessungen durchgeführt. Jedoch finden sich dazu nur Angaben zu Maximaldrücken, die in der Auslegung der Axialventilatoren verwendet wurden. Als dimensionsrelevant wurde ein Maximalwert von 700 Pa angeführt. Diese Angabe ist für eine Berechnung des Potenzials zur Energieumwandlung jedoch nicht brauchbar.

Plabutschunnel: Im Plabutschunnel fanden im Rahmen dieses Projektes ebenfalls Messungen der Portaldrücke statt. Der Messzeitraum umfasste jedoch nur die Monate Oktober bis März 2023, sodass auch hier für weiterführende Analysen Annahmen getroffen werden müssen.



**Abbildung 8: Perzentil Werte des Auftriebsdruckes [Pa] in Schächten, unterschiedliche Messzeiträume; Achtung: unterschiedliche Auswertzeiträume!**

Abbildung 9 zeigt exemplarisch das Histogramm der Auf- und Abtriebswerte für die Messung im November 2009. Ausgewertet wurden nur Zeiträume, in denen die Lüftung nicht in Betrieb war.



**Abbildung 9: Histogramm des Auftriebsdruckes [Pa] im Nordschacht des Gleinalmtunnels für den Zeitraum November 2009, y-Achse entspricht der Anzahl von Dreiminuten-Mittelwerten**

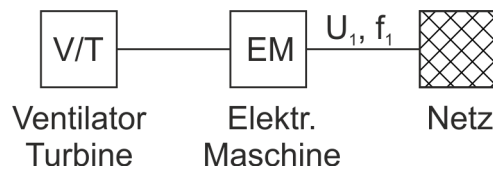
## 5 NOTWENDIGE ELEKTROTECHNISCHE AUSSTATTUNG

### 5.1 Elektromechanische Energieumwandlung

Um eine Asynchronmaschine in den generatorischen Betrieb zu bringen, muss sich das Drehfeld dem Betrage nach geringfügig langsamer drehen als der Rotor. Bei Speisung der Maschine vom Netz konstanter Frequenz ist die Synchrondrehzahl (Drehmoment Null) durch die Netzfrequenz und die Polpaarzahl der Maschine fixiert. Die Strömungsmaschine muss also bei nahezu konstanter Drehzahl ihr Verhalten ändern, um vom Ventilatorbetrieb in den Turbinenbetrieb zu wechseln. Dies wäre bei schaufelverstellbaren Ventilatoren zumindest denkbar. Die Polumschaltung der Asynchronmaschine verändert die Synchrondrehzahl.

Die Rotordrehzahl von Synchronmaschinen ist durch die Speisefrequenz und die Polpaarzahl der Maschine fixiert. Ein Übergang vom motorischen- in den generatorischen Betrieb bei Speisung mit konstanter Frequenz ist grundsätzlich nur durch die Last möglich.

Die direkte Netzanbindung der Drehfeldmaschine erlaubt sowohl den motorischen- als auch den generatorischen Betrieb der Maschine. Dabei treibt die elektrische Maschine (EM) einen Ventilator (V) oder sie wird von einer Turbine (T) angetrieben (siehe Abbildung 10).

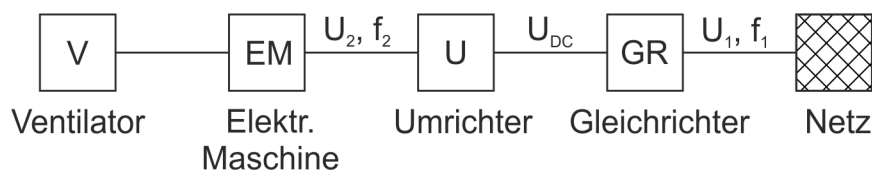


**Abbildung 10: Drehfeldmaschine direkt am Wechselspannungsnetz der Spannung  $U_1$  und der Frequenz  $f_1$**

Wenn es nun von der Lastseite her für einen generatorischen Betrieb erforderlich ist, die Drehzahl zu verändern, so ist dafür eine Änderung der Speisefrequenz, und damit einhergehend auch eine Änderung der Amplitude der Speisespannung notwendig. Dies gilt sowohl für die asynchrone als auch für die synchrone Bauart der Drehfeldmaschine.

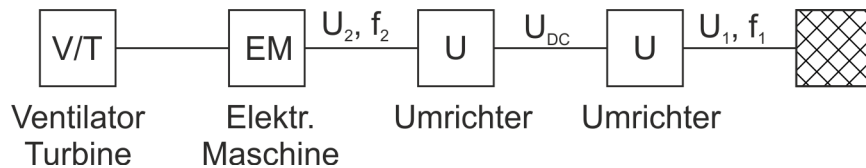
Als Stellglied, welches dies leisten kann, wird hier der Gleichspannungszwischenkreis betrachtet.

Die bestehenden drehzahlvariablen Antriebe sind mit nicht rückspeisefähigen Umrichtern ausgestattet (Abbildung 11). Sowohl auf der Netzseite, als auch auf der Maschinenseite des Umrichters (speist ausschließlich die elektrische Maschine) sind Filtereinrichtungen vorgesehen, um die einschlägigen Bestimmungen betreffend NetZRückwirkung und Funkverkehr zu erfüllen. Diese Filtereinrichtungen werden für die späteren Wirkungsgradabschätzungen nicht berücksichtigt. Die netzseitige Drossel wird jedoch mitberücksichtigt.



**Abbildung 11: Antrieb mit nicht-rückspeisefähigem Umrichter, bestehend aus netzseitigem Gleichrichter, Gleichspannungszwischenkreis ( $U_{DC}$ ) und maschinenseitigem Umrichter.**

Um die Rückspeisung von elektrischer Energie in das speisende Netz zu ermöglichen, ist auch auf der Netzseite des Gleichspannungszwischenkreises eine leistungselektronische Schaltung vorzusehen, wie sie auf der Maschinenseite vorhanden ist (Abbildung 12). Der maschinenseitige Umrichter speist die elektrische Maschine mit der variablen Spannung  $U_2$  und variablen Frequenz  $f_2$ . Netz- und maschinenseitige Filter und Induktivität auf der Netzseite sind nicht eingezeichnet. Beide Energieflussrichtungen sind möglich.



**Abbildung 12: Antrieb mit rückspeisefähigem Umrichter, bestehend aus netzseitigem Umrichter, Gleichspannungszwischenkreis ( $U_{DC}$ ) und maschinenseitigem Umrichter.**

Es wäre auch möglich mehrere maschinenseitige Umrichter von nur einem Gleichspannungszwischenkreis aus zu versorgen. Der netzseitige Umrichter ist dann leistungsstärker auszuführen und es wäre ein Gleichspannungsnetz zu errichten. Diese Variante wird hier nicht weiter betrachtet.

## 5.2 Bestand

Im Rahmen dieses Projektes werden für ausgewählte Tunnelanlagen die derzeit vorhandenen Lüftungstechnischen Anlagenteile erhoben und deren Eignung für den generatorischen Betrieb untersucht. Anhand der eingesehenen Unterlagen zu den Tunneln Arlberg, Gleinalm, Bosruck, Plabutsch und Semmering wird Folgendes festgehalten:

- Die vorgesehene Energieflussrichtung ist in all diesen Fällen vom Netz zum Ventilator.
- Die elektrische Maschine treibt als Motor den Ventilator an.

### 5.2.1 Abluftventilatoren

- Polumschaltbare Asynchronmaschinen direkt am Netz 6 kV - 50 Hz oder 690 V - 50 Hz.
- Im Plabutschtunnel werden dafür umrichtergespeiste Asynchronmaschinen verwendet. Der nicht rückspeisefähige Umrichter wird aus dem 400V - 50 Hz Netz gespeist.
- Alle Maschinen sind für Betriebsart S1 (Dauerbetrieb) ausgelegt.

### 5.2.2 Strahlventilatoren

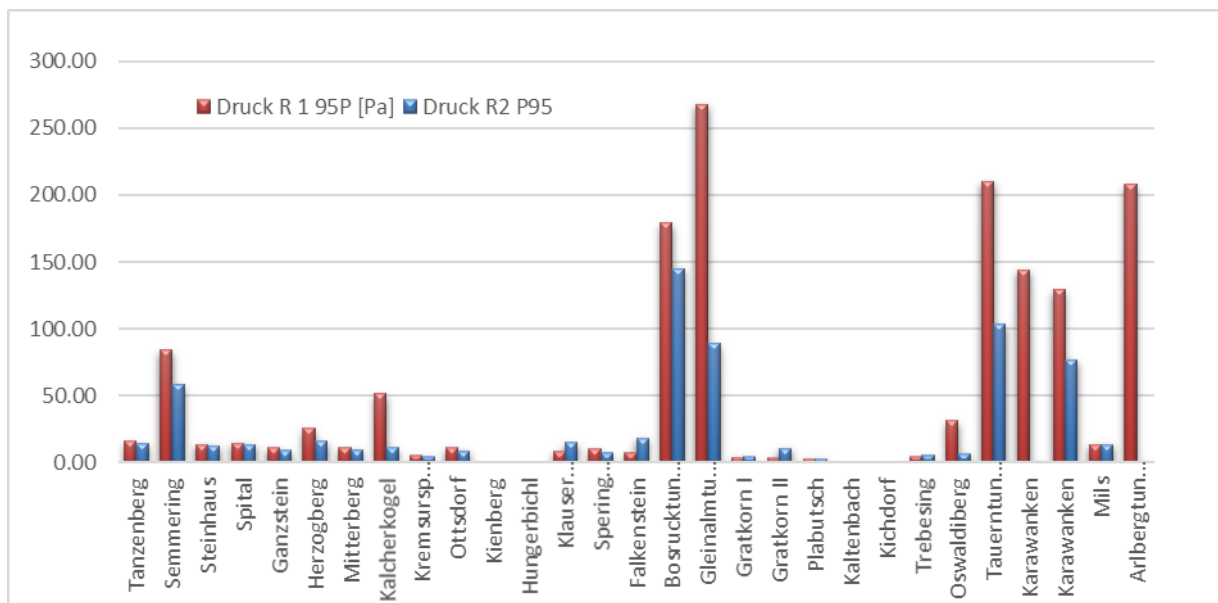
- Asynchronmaschinen direkt am Netz (Semmering, 400 V - 50 Hz) oder über nicht rückspeisefähige Umrichter (Gleinalm, 400 V - 50 Hz oder Bosruck 690 V - 50 Hz) versorgt.
- Die Maschinen sind für Betriebsart S1 (Dauerbetrieb) ausgelegt.

## 6 ABSCHÄTZUNG DES POTENZIALS ZUR ERZEUGUNG ELEKTRISCHER ARBEIT AUS DEN PORTALDRUCKDIFFERENZEN

Mit den in Kapitel 2 angeführten Methoden lässt sich die aus druckgetriebenen Strömungen erzeugbare theoretische Turbinenleistung berechnen. Dazu sind die in Kapitel 4 aufgelisteten, aus Messungen bekannten Druckdifferenzen (Portaldrücke und Auftrieb) notwendig. Über den zeitlichen Verlauf der auftretenden Druckdifferenzen lässt sich in weiterer Folge ein Betrag der Jahresenergiemenge ableiten.

### 6.1 Potenzial der Portaldruckdifferenzen

Zur Abschätzung einer Jahresenergiemenge ist der zeitliche Verlauf der auftretenden Portaldruckdifferenzen notwendig. Abbildung 13 zeigt die messtechnisch ermittelten Portaldruckdifferenzen bei den oben angeführten zweiröhriigen Straßentunneln im ASFINAG Straßennetz.



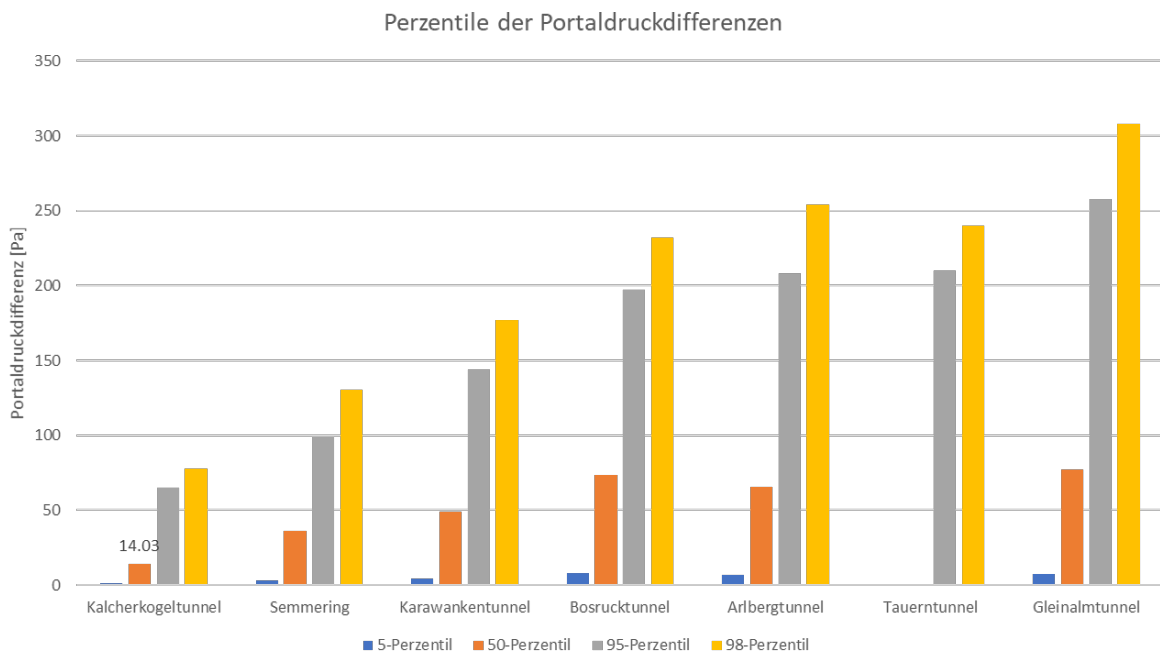
**Abbildung 13: Meteorologisch bedingte Portaldruckdifferenzen als 95% Perzentil bei zweiröhriigen Tunneln**

Beim Großteil der angeführten Straßentunneln liegt die Portaldruckdifferenz bereits im 95 Perzentil unter 50 Pa. Für weitere exemplarische Betrachtungen werden daher nur mehr die Tunnel Kalcherkogel und Semmering – stellvertretend für längsgelüftete Tunnel – sowie ausgewählte quergelüftete Tunnelanlagen betrachtet.

Name	Länge [m]	5-P [Pa]	50-P [Pa]	95-P [Pa]	98-P [Pa]
Kalcherkogeltunnel	2150	1	14	65	78
Semmering	3062	3	36	99	131
Karawankentunnel	7864	4	49	144	177
Bosrucktunnel	5500	8	73	197	232
Arlbergtunnel	13972	7	66	208	254
Tauerntunnel	6546	5	27	210	240
Gleinalmtunnel	8320	7	77	258	308

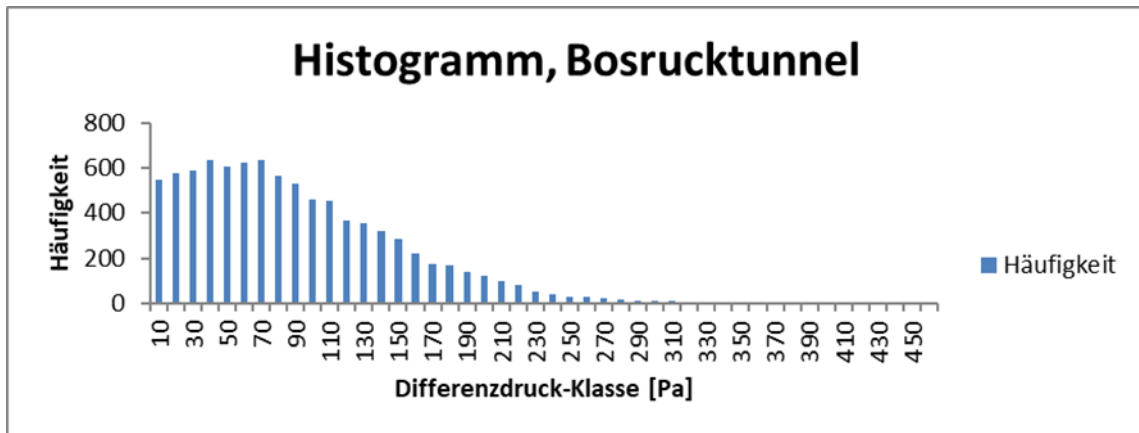
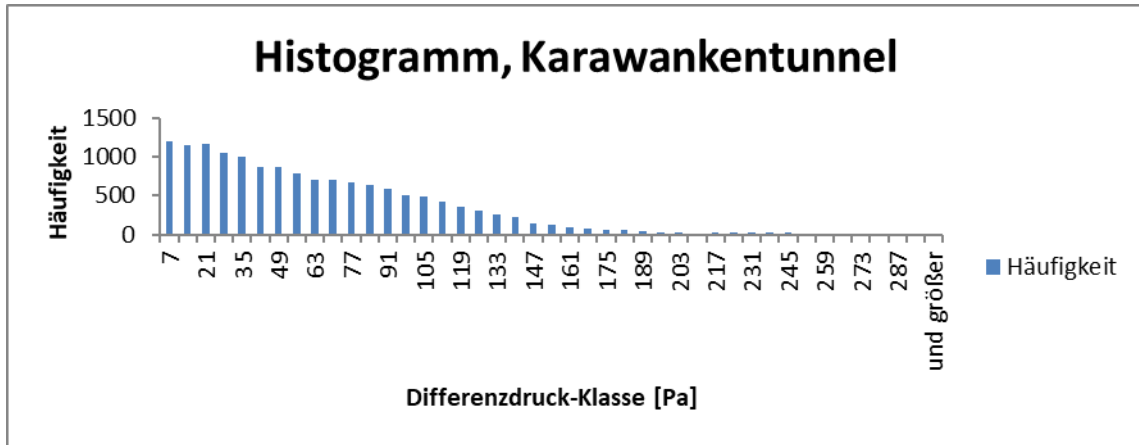
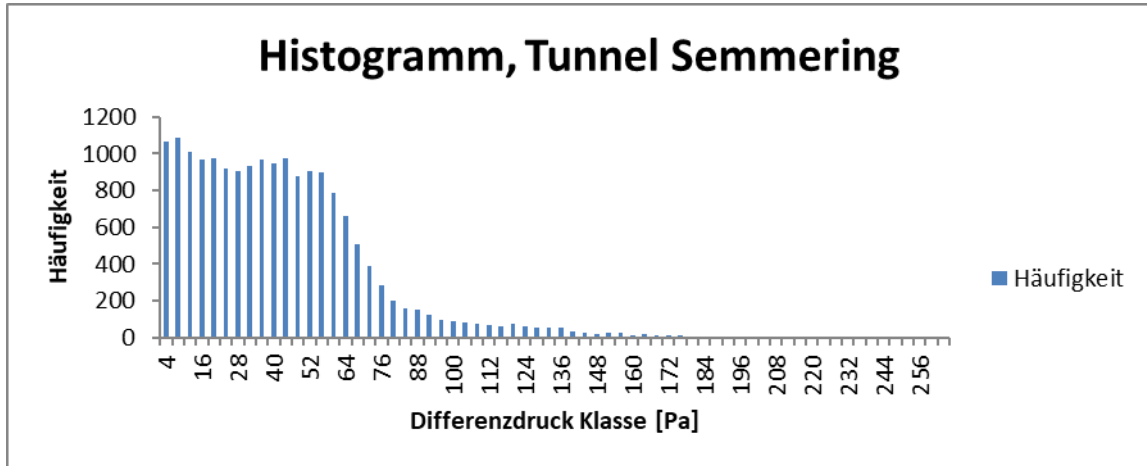
**Tabelle 3: Portaldruckdifferenzen ausgewählter Tunnelanlagen**

Wie aus Tabelle 3 und Abbildung 14 ersichtlich, liegt bei den längsgelüfteten Tunnelanlagen im Median die Druckdifferenz bereits merklich unter 50 Pa und bei den langen alpenquerenden Tunneln zwischen 50 und 77 Pa.



**Abbildung 14: Portaldruckdifferenzen ausgewählter Tunnelanlagen**

Histogramme ermöglichen eine statistische Betrachtung des Jahresverlaufes der Druckdifferenzen (bei den Histogrammen erfolgt keine Aufteilung nach Vorzeichen, d.h. es gehen beide Richtungen in die Auswertung mit ein).



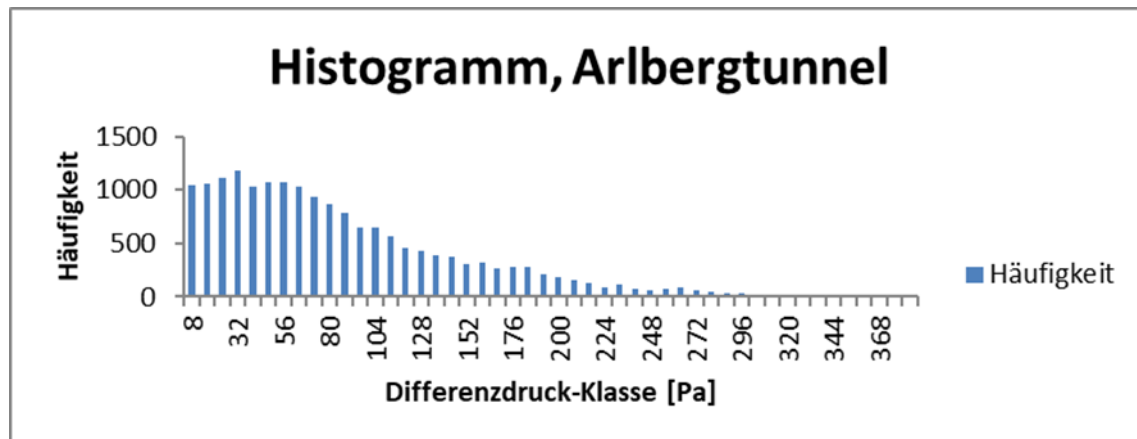


Abbildung 15: Histogramm der Druckdifferenzen an ausgewählten Tunnelanlagen, y-Achse entspricht der Anzahl von Halbstunden-Mittelwerten

## 6.2 Abschätzung von Jahresenergiemengen aus den Portaldruckdifferenzen (Nutzung einer Längsströmung)

### 6.2.1 Theoretisch aus den Portaldruckdifferenzen zur Verfügung stehende Jahresenergiemenge (aerodynamischer Anteil)

Zur Ermittlung der Jahresenergie ist neben der Kenntnis der Druckdifferenzen auch jene des Volumenstroms und somit der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche notwendig (vgl. Gleichung 4). Bei der im Folgenden durchgeführten Abschätzung der Jahresenergiemengen wird von folgenden Rahmenbedingungen ausgegangen:

- Querschnittsfläche eines Ventilators, Anzahl der Ventilatoren wie im Bestand
- Querschnittsfläche des Ab/Zuluftkanals bei quergelüfteten Tunneln mit durchgehenden Kanälen
- Gesamte Querschnittsfläche des Tunnels (maximal möglich Querschnittsfläche)

Bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt sind jegliche Verluste, die sich aus der Umwandlung von Druck in elektrische Energie ergeben. Konkret betrifft dies strömungstechnische Verluste der Turbine sowie elektrische und mechanische Verluste von Generator und Frequenzumrichter.

Die notwendigen tunnelspezifischen Daten sind in Tabelle 4 angeführt.



	Semmering	Kalcherkogel	Arlbergtunnel	Bosruck	Gleinalm	Karawanken
Querschnittsfläche Strahlventilator [m <sup>2</sup> ]	1.23	2	2	2	2	2
Querschnittsfläche Abluftkanal [m <sup>2</sup> ]			11.5	12.77	13.69	9
Anzahl der Strahlventilatoren	14	10	3	10	14	10
Tunnellänge l [m]	3062	2150	13972	5500	8320	6546

**Tabelle 4: Tunnelspezifische Eingangsdaten zur Abschätzung der erzielbaren Turbinenleistung**

Für die anderen notwendigen Eingangsdaten wurden zwecks Vergleichbarkeit folgende Annahmen getroffen:

Querschnittsfläche Tunnel 48.7 m<sup>2</sup>, hydraulischer Durchmesser 6.9 m, Luftdichte 1.1 kg/m<sup>3</sup>, Wandrauigkeit 0.016, Eintrittsverlust 0.3

Tabelle 5 enthält das Leistungsspektrum, welches zwischen dem 5% Perzentil und dem 98% Perzentil der meteorologisch bedingten Druckdifferenzen im Idealfall anfallen würde. Noch nicht berücksichtigt ist bei der Betrachtung der Leistungen bezogen auf den Querschnitt des Rotors der bestehenden Strahlventilatoren das Faktum, dass aufgrund des erhöhten Widerstandes der Rotordurchströmung es zu einer Ausweichströmung kommt. Dadurch reduziert sich der Volumenstrom durch den Rotor und somit die Leistung. Eine Abschätzung dieses Einflusses erfolgt bei der Betrachtung der möglichen generierbaren Jahresenergie (vgl. Tabelle 6).

	Querschnitt Strahlventilator		Querschnitt Luftkanal	
	P_5	P_98	P_5	P_98
Kalcherkogel	0	0.3		
Semmering	0.001	0.3		
Arlberg	0.003	0.7	0.02	4.1

	Querschnitt Strahlventilator		Querschnitt Luftkanal	
	P_5	P_98	P_5	P_98
Bosruck	0.006	0.9	0.04	6.2
Gleinalm	0.004	1.2	0.03	8.5
Karawanken	0.001	0.5	0.008	2.4

**Tabelle 5: Theoretisch generierbare Leistung in kW, berechnet mit dem 5 und dem 98 Perzentil der Druckdifferenzen**

Basierend auf den Histogrammen der Druckdifferenzen und der Leistungsberechnung lässt sich eine Jahresenergiemenge für jeden Tunnel – und daraus rückgerechnet eine durchschnittliche Turbinenleistung für jeden Tunnel errechnen.

Weitere Rahmenbedingungen für die Berechnung der nachfolgenden Jahresarbeit:

- Für die Berechnung der Jahresenergiemenge wurde stets die maximal mögliche Turbinenleistung im optimalen Betriebspunkt verwendet, unverändert für jede vorliegende Druckdifferenz. Dies ist eine optimistische Annahme, welche im realen Betrieb nur schwer umzusetzen ist. Meistens wird die Turbine nicht im optimalen Betriebspunkt laufen, wodurch die abgegebene Leistung sinkt.
- Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass jede anliegende Druckdifferenz zur Energienutzung herangezogen werden kann. Liegen nur sehr kleine Druckdifferenzen vor, so lässt sich für diese zwar eine theoretische Leistung berechnen, die genutzt werden könnte, es wird jedoch nicht berücksichtigt, dass sich bei sehr kleinen Druckdifferenzen und Strömungsgeschwindigkeiten das Rotorblatt der Turbine eventuell gar nicht drehen wird, wodurch auch keine Leistung abgerufen werden kann. Auch ein eventuelles Feststellen oder Abbremsen der Turbine bei sehr großen Strömungsgeschwindigkeiten wird nicht in der Berechnung berücksichtigt.
- Notwendige bauliche Rahmenbedingungen werden im Rahmen dieses Projekts ebenfalls nicht berücksichtigt. Dies ist vor allem für jene Tunnelanlagen relevant, bei denen ein durchgehender Ab- oder Zuluftkanal vorliegt (Halb- bzw. Vollquerlüftung).
- Bei der Nutzung der Strahlventilatoren als Turbine bzw. Generator wird nicht berücksichtigt, ob diese gerade zur Belüftung des Tunnels aktiviert sind. Im Fall eines aktivierten Strahlventilators könnte in diesem Zeitraum logischerweise keine Energie nutzbar gemacht werden.

- Die Hochrechnung der Leistung aller im Tunnel installierten Strahlventilatoren erfolgt über eine einfache Multiplikation mit der Anzahl der Turbinen, ohne Berücksichtigung möglicher gegenseitiger Beeinflussungen.

Tabelle 6 enthält die auf dieser Basis errechnete theoretisch mögliche Jahresenergiemenge und daraus rückgerechnet eine auf den Jahresdurchschnitt bezogenen mittlere Leistung. Die bei den Rubriken „Strahlventilator“ und „alle SV“ angegebenen Werte für die Jahresenergiemenge betreffen die theoretisch erzielbaren Jahresenergiemengen sowie hinter dem Schrägstrich die Jahresenergiemengen unter Berücksichtigung der Ausweichströmung um ein frei anströmbares Windrad aufgrund des erhöhten Widerstandes bei Durchströmung desselben. Einen Anhaltswert für die Bewertung des Leistungsverlustes durch Ausweichströmungen liefert das Betzsche Gesetz (Betz, 1920). Dieses Theorem besagt, dass eine Windkraftanlage maximal  $16/27$  (knapp 60 Prozent) jener mechanischen Leistung, die der Wind ohne den bremsenden Rotor durch dessen Projektionsfläche (Rotorfläche, Erntefläche, Wirkscheibe senkrecht zur Windrichtung) transportieren würde, in Nutzleistung umwandeln kann<sup>2</sup>, vgl. (Schaffarczyk, 2014). Bei Kanalströmungen, wie jene in Tunnelanlagen, ist eine Ausweichbewegung nicht so leicht möglich, wie in der freien Atmosphäre. Der Parameter Tunnelquerschnitt zu Rotorfläche ist da sicherlich von entscheidender Bedeutung. Es gibt jedoch derzeit keine wissenschaftlich fundierten Aussagen dazu, sodass die angeführten 60% einen guten Anhaltswert darstellen.

	Querschnitt Strahlventilator		Alle SV	Querschnitt Luftkanal	
	P_Mittel	Jahresenergie	Jahresenergie	P_Mittel	Jahresenergie
	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kW]	[kWh]
Kalcherkogel	0.05	438/263	4380/2628		
Semmering	0.07	613/368	8760/5256		
Arlberg	0.16	1401/841	4204/2522	0.9	7884
Bosruck	0.26	2277/1366	22776/13666	1.6	14016
Gleinalm	0.28	2452/1471	34164/20498	1.9	16644

<sup>2</sup> Siehe auch [https://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches\\_Gesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches_Gesetz) (Zugriff 18.6.23)

	Querschnitt Strahlventilator		Alle SV	Querschnitt Luftkanal	
	P_Mittel	Jahresenergie	Jahresenergie	P_Mittel	Jahresenergie
Karawanken	0.1	876/526	15768/9461	0.6	5256

**Tabelle 6: Theoretisch generierbare Leistung im Jahresmittel sowie theoretisch maximal erzielbare Jahresenergiemenge**

### 6.2.2 Reale (verlustbehaftete) aus den Portaldruckdifferenzen zur Verfügung stehende Jahresenergiemenge

Um im realen Fall auftretende Verluste zu berücksichtigen, werden folgende Wirkungsgrade angenommen:

Turbinenwirkungsgrad<sup>3</sup>  $\eta_T = 0,7$

Wirkungsgrade elektrische Seite:

Bei der Betrachtung der Wirkungsgradkette (Generator, Umrichter) wird unterschiedlich vorgegangen.

- Für ausgewählte Tunnelanlagen erfolgt eine Betrachtung der Wirkungsgrade, die von konstanten Verlusten am Nennpunkt ausgeht und es werden nur positive Leistungsanteile gemäß Gleichung 10 verwendet (genaue Vorgangsweise siehe Kapitel 7)<sup>4</sup>. Es sind dies die Tunnel Semmering, Bosruck und Gleinalm bei Längslüftung sowie Plabutsch Nord und Gleinalm Nord bei Betrachtungen der Schachtströmungen.
- Bei den restlichen Tunneln erfolgt eine ähnliche Vorgangsweise, jedoch wurde vereinfacht Daten Werte von Maschinen ähnlicher Größenordnung verwendet.
  - Bei der Betrachtung der längsgelüfteten Tunnel (Strahlventilatoren) werden die elektrischen Verlustleistungen des Semmering Tunnels auch für den Kalcherkogel Tunnel und Karawanken Tunnel übernommen. Für den Arlbergtunnel wurden die elektrischen Verlustleistungen des

<sup>3</sup> Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt die strömungsseitigen Verluste durch Reibung und Widerstände im Bereich der Turbine und des Generators, mechanische Verluste wie z.B. Lagerverluste werden dem Generator zugerechnet

<sup>4</sup> Wie in Kapitel 7 angeführt, wird bei der Berücksichtigung der elektrischen Verluste von den Mindestvorgaben gem. den entsprechenden Normen ausgegangen. In der Realität sind die Verluste bei Generator, Frequenzumrichter u.ä. merklich geringer, sodass hier eher eine worst-case Betrachtung vorliegt.

Bosrucktunnels bei den Maschinen im Fahrraum bzw. jene des Gleinalmtunnels für die Betrachtung der Strömungen durch den Abluftkanal übernommen.

- Bei der Betrachtung der Schachtströmungen wurden bei der Abschätzung der Jahresenergiemenge für den Gleinalm Südschacht die Werte des Nordschachtes übernommen. Für den Arlbergtunnel wurden beim Albonaschacht die Verlustwerte des Plabutsch Nord und beim Schacht Maienwasen jene des Gleinalm Nordschachtes übernommen.

Werden nun auch die oben definierten Wirkungsgrade für Turbine, Generator und Frequenzumformer berücksichtigt, ergibt sich ein deutlich reduziertes Leistungsspektrum.

Tabelle 7 gibt das notwendige Leistungsspektrum einer Turbine im Bereich zwischen dem 5% und dem 98 % Perzentil an.

	Querschnitt Strahlventilator <sup>5</sup>		Querschnitt Luftkanal	
	P_5	P_98	P_5	P_98
Kalcherkogel	0	0.17		
Semmering	0	0.2		
Arlberg	0.002	0.3	0.01	2.1
Bosruck	0.004	0.6	0.02	3.8
Gleinalm	0.002	0.7	0.02	5.1
Karawanken	0.001	0.3	0.005	1.3

**Tabelle 7: Generierbare Leistung in kW, berechnet mit dem 5 und im 98 Perzentil der Druckdifferenzen, elektrischer Wirkungsgrad für alle angegebenen Leistungen angenommen  $\eta_{\text{elektrisch}}=0,75$**

Betrachtet man die ausschließlich längsgelüfteten Tunnel Kalcherkogel und Semmering Scheiteltunnel, so erkennt man, dass, bezogen auf eine Windturbine mit den geometrischen Ausmaßen eines derzeit im jeweiligen Tunnel verbauten Ventilators, nur an 2% der Jahrestunden (98% Perzentil) eine Leistung im Bereich um 200 W erzielt werden kann.

<sup>5</sup> Gem. Betzschem Gesetz maximal 60% davon generierbar

Betrachtet man die alpenquerenden langen Tunnel mit Halb- und Vollquerlüftungssystemen, so wären bei den im Fahrraum installierten Strahlventilatoren zu 2% der Jahreszeiten (98% Perzentil) bis zu 700 W zu erzielen.

Berücksichtigt man den vorhin definierten Gesamtwirkungsgrad, ergeben sich auch für die Mittelleistung bzw. Jahresenergiemenge deutlich reduzierte Werte (siehe Tabelle 8).

	Querschnitt Strahlventilator <sup>6</sup>		Alle SV <sup>6</sup>	Querschnitt Luftkanal	
	P_Mittel [kW]	Jahresenergie [kWh]	Jahresenergie [kWh]	P_Mittel [kW]	Jahresenergie [kWh]
Kalcher- kogel	0.003	26	260		
Semmering	0.002	18	252		
Arlberg	0.020	173	521	0.22	1943
Bosruck	0.039	344	3440	0.61	5323
Gleinalm	0.044	385	5390	0.58	5079
Karawanken	0.016	142	1985	0.19	1645

**Tabelle 8: Generierbare, verlustbehaftete Leistung im Jahresmittel sowie verlustbehaftete Jahresenergiemenge**

Anmerkung: Weitere Einflussgrößen wie variable Strömungsgeschwindigkeit, Trägheit der Luftmasse, aktivierter Lüftungsbetrieb usw. wurden für die Ermittlung der Jahresenergiemengen nicht berücksichtigt.

### 6.3 Potenzial des Schachtauftriebes

Hohe Ab- und Zuluftschächte haben in der Regel ein größeres Potenzial für die Nutzung von Auftriebsströmungen zur Stromerzeugung. Gleichzeitig werden diese Schächte aber auch mehr oder weniger oft während des Normalbetriebes zur Sicherstellung der notwendigen Luftgüte im Tunnel gebraucht. Bei einem einröhrigen Tunnel, wie dem Arlbergtunnel, ist dies sehr oft der Fall. Bei zweiröhrigen Tunneln – wie z.B. dem

<sup>6</sup> Gem. Betzschem Gesetz maximal 60% davon generierbar

Gleinalmtunnel – reicht oft die Selbstbelüftung durch Fahrzeuge aus, sodass die Schachtventilatoren nur mehr selten eingesetzt werden müssen. Derartige Aspekte sind natürlich bei der Abschätzung des Potenzials zur Verstromung zu beachten.

Nachdem bei den einzelnen Tunnelanlagen kaum durchgängige Messreihen bzw. auch Messreihen nur über wenige Monate vorliegen, müssen Annahmen bezüglich des Auffüllens dieser Messdaten getroffen werden.

Prinzipiell wurde je nach Tunnel folgende Vorgangsweise angewendet (Kovacevic, 2023):

Arlbergtunnel: Zur Berechnung der Jahresenergiemenge werden lediglich jene Zeiträume herangezogen, bei denen der Abluftschacht nicht durch den Betrieb der mechanischen Lüftung oder durch Selbstbelüftung blockiert war.

Gleinalmtunnel: Unterschiedlich zum Arlbergtunnel werden beim Gleinalmtunnel die Abluftschächte nur mehr im Falle eines Brandes im Tunnel benötigt (Abluft-Halbquerlüftung). Somit stehen die beiden Schächte zur energetischen Nutzung der Auftriebsströmung zur Verfügung. Daten bezüglich der Druckunterschiede zwischen Schachtein- und -austritt stehen jedoch im Gleinalmtunnel nur für einen eingeschränkten Zeitraum (Oktober - Dezember) zur Verfügung. Um nun auf Jahresverläufe abstellen zu können, wurde auf einen Vergleich zu den Jahresmessungen am Arlbergtunnel zurückgegriffen. Anmerkungen: Dieser Vergleich ist mit Vorsicht zu genießen, da sich die beiden Tunnel in gänzlich anderen Gegenden befinden und unterschiedliche Ausrichtungen (O-W beim Arlbergtunnel und N-S beim Gleinalmtunnel) haben. Es stehen jedoch keine anderen vergleichbaren Datengrundlagen zur Verfügung, sodass dieser Weg der derzeit einzig verfügbare zur Abschätzung von Jahresverläufen ist. Aus diesem Vergleich lässt sich ableiten, dass über die restliche Zeit (Jänner bis September) ca. 78% der während der Periode Oktober bis Dezember festgestellten Auftriebsströmungen vorliegen.

Plabutschunnel: Hier liegt eine ähnliche Problematik bezüglich der Messdauer wie im Gleinalmtunnel vor. Messdaten wurden für den Zeitraum November bis Februar erfasst. Der Vergleich mit den Daten am Arlberg führt dazu, dass für den Zeitraum März bis Oktober das Potenzial der Auftriebskräfte 54% beträgt.

Tabelle 9 fasst die Verhältnisse zwischen Messperiode (kalt) und Restperiode (warm) auf Basis der Messdaten Arlbergtunnel zusammen.

	Verhältnis $\varepsilon$ : Auftriebsdruck warm/kalt	Messzeitraum
Plabutsch	54%	Kalte Periode: Anfang November bis Anfang März
Gleinalm	78%	Kalte Periode: Anfang Oktober bis Ende Dezember

**Tabelle 9: Verhältnisse der Auftriebsdruck-Mittelwerte in der warmen und kalten Messperiode**

## 6.4 Abschätzung von Jahresenergien aus den Auftriebsströmungen

### 6.4.1 Randbedingungen

In Analogie zu der unter Kapitel 6.2 angeführten Vorgangsweise lassen sich auch hier wieder Angaben über theoretisch mögliche Potenziale der Nutzung der Schachtströmungen zur Verstromung ableiten. Um dies zu machen, sind auch hier wiederum Angaben über geometrische Abmessungen und Strömungswiderstände notwendig.

	Gleinalm Nord	Gleinalm Süd	Arlberg Albona	Arlberg Maienwasen	Plabutsch Nord	Plabutsch Süd
Querschnittsfläche Zuluft [m <sup>2</sup> ]	17.3	17.3	20	23.5	28	28
Querschnittsfläche Abluft [m <sup>2</sup> ]	13.7	13.7	24.5	28.79	28	28
Hydraulischer Durch- messer Zu/Abl. [m]	4.2/3.6	4.2/3.6	4.3/4.5	4.5/5.2	je 5.14	je 5.14
Schachthöhe [m]	366	287	778	260	240	90

**Tabelle 10: Tunnelspezifische Eingangsdaten zur Abschätzung der Jahresenergie**

Die Volumenstromberechnung wurde immer auf den Querschnitt des Abluftkanals bezogen.



Für die anderen notwendigen Eingangsdaten wurden zwecks Vergleichbarkeit folgende Annahmen getroffen:

Luftdichte  $1.1 \text{ kg/m}^3$ , Wandrauigkeit 0.016, Eintrittsverlust 1

Weiters wird bei der Angabe der verlustbehafteten Werte von folgenden Wirkungsgraden ausgegangen:

- Turbinenwirkungsgrad  $\eta_i = 0,7$
- Elektrische Wirkungsgradkette: hier wird wie bei Kapitel 6.2.2 angeführt vorgegangen.

Eventuell notwendige bauliche Anpassungen werden nicht berücksichtigt. Querschnitte wie in Tabelle 10 angeführt können aufgrund der näherungsweise halb- oder viertelkreisförmigen Geometrie nicht vollständig von einem Turbinenrad ausgefüllt werden. Die Nutzung des gesamten Schacht- bzw. Luftkanalquerschnitts ist eine optimistische Annahme, da hier bauliche Maßnahmen notwendig wären.

#### 6.4.2 Abschätzung der Jahresenergiemenge

Bei der Abschätzung der Jahresenergiemenge sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

Arlbergtunnel: Eine Generierung von elektrischer Energie durch die Auftriebsströmungen ist nur während 34% der Jahresstunden möglich.

Gleinalm und Plabutschtunnel: Da sowohl im Gleinalm wie auch im Plabutschtunnel keine Messdaten für ein komplettes Jahr vorliegen, ist eine rechnerische Abschätzung notwendig, um den in den Sommermonaten geringer ausfallenden thermischen Auftrieb in die Berechnung des Leistungs- und Energiepotentials mit einfließen zu lassen. Die Laufzeit der Lüftungsmaschinen wird seitens der ABV Plabutsch mit  $< 5\%$  der Jahresstunden angeführt<sup>7</sup>. Die dadurch eintretende geringfügige Reduktion der Verfügbarkeit des Schachtes bleibt aufgrund der gesamten Unsicherheit in der Betrachtungen unberücksichtigt.

Die Leistung einer Turbine lässt sich mit dem in Gleichung 4 angegebenen Ansatz errechnen. Da nur ausschließlich für die Messperioden Daten vorliegen wird dieser Ansatz

---

<sup>7</sup> E-Mail vom 02.05.2023, rVMZ Plabutsch

auch für die unmittelbare Berechnung des Leistungsspektrums während dieses Zeitraums verwendet. Während der restlichen Periode liegt eine auf die in Tabelle 9 angeführte reduzierte Druckdifferenz vor. Somit reduziert sich auch die theoretisch erzeugbare Leistung auf den Faktor  $\sqrt{\varepsilon^3}$ . Somit lässt sich die durchschnittliche Jahresleistung wie folgt berechnen:

$$P_{Jahr} = P_{Periode\_kalt} * \left( \frac{n_{kalt}}{n_{Jahr}} + \frac{n_{warm}}{n_{Jahr}} * \sqrt{\varepsilon^3} \right)$$

#### Gleichung 5

Hierbei beschreibt  $n_{kalt}$  die Anzahl der kalten Monate, in denen Messwerte vorliegen und mit der die Periodenleistung berechnet wurde.  $n_{warm}$  ist die Anzahl der warmen Monate, in denen keine entsprechende Messung vorliegt.  $n_{Jahr}$  hat den Wert 12 (Monate) und  $\varepsilon$  stellt das berechnete Verhältnis zu den Auftriebsdruck-Mittelwerten des Arlbergtunnels der entsprechenden Perioden gemäß Tabelle 9 dar.

Die Periodenleistung bzw. Periodenenergiemenge von Gleinalm- und Plabutschtunnel wird in einem ersten Schritt mit den zeitlich begrenzten Messdaten (kalte Jahreszeit) berechnet und für das gesamte Jahr angenommen. In einem weiteren Schritt werden unter Verwendung der oben angeführten Parameter sowie der messtechnisch erhobenen und modifizierten Druckdifferenzen die Leistungsdaten sowie Jahresenergiemengen ermittelt:

	P_Mittel [kW]	Jahres- energie [kWh]	Anmerkung
Gleinalm Nord	0.63	5545	Jahresdaten hochgerechnet <sup>8</sup>
Gleinalm Süd	0.30	2628	Jahresdaten hochgerechnet <sup>8</sup>
Arlberg Albona	2.20	19272	Lüfterbetrieb 66% der Jahresstunden
Arlberg Maienwasen	0.50	4380	Lüfterbetrieb 66% der Jahresstunden
Plabutsch Nord	2.80	24538	Jahresdaten hochgerechnet <sup>8</sup> , Lüfterbetrieb < 5% der Jahresstunden

<sup>8</sup> Jahresdaten hochgerechnet, Messwerte für die Sommermonate wurden über Analogie zum Arlbergtunnel abgeschätzt

	P_Mittel [kW]	Jahresen- ergie [kWh]	Anmerkung
Plabutsch Süd	0.58	5056	Jahresdaten hochgerechnet <sup>8</sup> , Lüfterbetrieb < 5% der Jahresstunden

**Tabelle 11: Generierbare Leistung im Jahresmittel sowie erzielbare Jahresenergiemenge, berechnet für den Querschnitt des jeweiligen Abluftschachtes**

Anmerkung:

- Die berechneten Leistungen stellen jeweils das rechnerisch erreichbare Maximum dar. Reduzierende Einflüsse wie aktivierte Lüfter aufgrund von Funktionsprüfungen (meist täglich), Wartungsarbeiten, variable Strömungsgeschwindigkeit, Trägheit der Luftmasse, Trägheit der Maschinen usw. sind hier nicht berücksichtigt.
- Die Jahresenergiemengen für den Gleinalm Nord- sowie den Plabutsch Nord-Abluftschacht wurden mit einer individuellen Berechnung für einen gewählten Normmotor ausgewertet. Die passenden Nennleistungen und die elektrischen Verlustleistungen wurden für diese Schächte ausgewählt. Die Jahresenergiemengen der übrigen Schächte wurden mit Anhaltswerten für den Generator sowie den elektrischen Leistungsverlust berechnet (siehe Seite 36), um Größenordnungen für die Jahresenergiemengen zu erhalten.

## **7 WIRKUNGSGRADABSCHÄTZUNG DER ELEKTRISCHEN MASCHINEN**

Als Anforderung an die elektrischen Maschinen für einen möglichen generatorischen Betrieb liegen aus obigen Betrachtungen Angaben zur Turbinenleistung vor, aber nicht zur Drehzahl.

Diese Leistungen liegen in einem Bereich, der mit Umrichtern, die am Netz mit 400 V – 50 Hz betrieben werden, erreichbar ist. Für die Wirkungsgradabschätzung werden daher solche Umrichter betrachtet.

Aus der Technical Specification IEC TS 60034-30-2: 2016 Efficiency classes of variable speed AC motors kann man Wirkungsgraduntergrenzen für den motorischen Betrieb der in Frage kommenden Maschinen entnehmen.

Aus IEC 61800-9-2:2017 Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven

applications – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters wird, anhand des dort angegebenen mathematischen Referenzmodells für das vollständige Antriebsgerät, der Wirkungsgrad der notwendigen Umrichter abgeschätzt.

In allen Effizienzklassen erreichen vierpolige Maschinen den besten Wirkungsgrad. Daher wird die Polzahl für die weitere Betrachtung mit vier festgelegt. Das bedeutet eine Synchrondrehzahl von 1500 U/Min bei Speisung vom 50 Hz Netz und einen Bereich von 1201 U/Min bis 1800 U/Min für die Nenndrehzahl bei drehzahlvariablen Antrieben.

Aus den vorliegenden Daten für die Turbinenleistung werden die Nennleistungen festgelegt. In Tabelle 12 verweist die Ortsbezeichnung SV auf die Berechnung für einen Strahlventilatorquerschnitt, die Bezeichnung LK verweist auf die Berechnung für den Lüftungskanalquerschnitt. Es wird vorausgesetzt, dass die angebotene Leistung auf die Nennleistung begrenzt wird. Diese Nennleistung wurde aus der Reihe der Normmotoren so ausgewählt, dass damit 99% bis 99,9% der angebotenen erwartbaren Jahresenergiemenge der elektromechanischen Energieumwandlung zugeführt werden ( $W_{J\text{-anteil}}$ ).

Tunnel	Bosruck		Gleinalm		Semmering	Gleinalm	Plabutsch
Ort	SV	LK	SV	LK	SV	Abluftschacht Nord	Abluftschacht Nord
$P_{\max}$ [kW]	1.85	11.8	1.9	13.3	0.65	28.9	68.6
$P_N$ [kW]	1.1	7.5	1.5	7.5	0.37	22.0	30.0
$W_{J\text{-anteil}}$ [%]	99.7	99.8	99.9	99.0	99.2	99.9	99.6

**Tabelle 12: Maximale Turbinenleistung  $P_{\max}$  (bei Turbinenwirkungsgrad  $\eta_{\text{Turbine}} = 0.7$ ) und ausgewählte Generatornennleistung  $P_N$**

In weiterer Folge wird versucht, eine untere Grenze für den erreichbaren Wirkungsgrad, bzw. in weiterer Folge für die nutzbare Energie, anzugeben. Dafür wird, entsprechend der geforderten Nennleistung, eine im Handel erhältliche Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) die der Effizienzklasse IE4 aus IEC TS 60034-30-2: 2016 entspricht, als Beispiel genommen. Aus dem im Datenblatt angegebenen motorischen Wirkungsgrad kann für den motorischen Nennpunkt die Verlustleistung  $P_{VN}$  berechnet werden.

$$P_{VN} = \frac{P_N}{\eta_N} - P_N$$

**Gleichung 6**

Mit:

$P_{VN}$ ...Verluste im Nennpunkt

$P_N$ ....Nennleistung motorisch

$\eta_N$ .....Wirkungsgrad im Nennpunkt

Anhand der Datenblattangaben werden von dieser Verlustleistung die Kupferverluste  $P_{CuS}$  abgezogen (das ist jener Anteil der Verlustleistung der als Stromwärme in den Wicklungen verloren geht).

$$P_{CuS} = 3 R_S I_N^2$$

**Gleichung 7**

$R_S$ .....Statorwiderstand

$I_N$ .....Statornennstrom

Die Differenz  $P_{Vdiff}$  wird als abhängig von der Drehzahl, aber als nicht abhängig vom Drehmoment betrachtet.

$$P_{Vdiff} = P_{VN} - P_{CuS}$$

**Gleichung 8**

Für den generatorischen Betrieb wird anhand der gegebenen Maschinenparameter für negative Nennleistung an der Welle (generatorischer Betrieb) die Statorspannung und der Statorstrom so berechnet, dass die Statorwirkleistung  $P_S$  gemäß Gleichung 9 berechnet werden kann.

$$P_S = P_{CuS,gen} + P_{Vdiff} - P_N = P_{VN,gen} - P_N$$

**Gleichung 9**

$P_S$ .....Statorwirkleistung

$P_{CuS,gen}$ ...Statorkupferverluste bei negativer Nennleistung an der Welle

$P_{VN,gen}$ ....Verluste bei negativer Nennleistung an der Welle.

Damit steht die Statorspannung und der Statorstrom zur Verfügung, um damit das Referenzmodell für die Umrichterverlustabschätzung aus IEC 61800-9-2:2017 auszuwerten. Für diese Abschätzung werden die Referenzmodellparameter aus dieser Norm verwendet.

Die gewählten Eingangsgrößen sind:

- Statorspannung, Statorstrom, Statorwirkleistung aus der vorhergehenden Berechnung. Die Drehzahl bleibt bei 1500 U/Min.

- Netzspannung 400V, 50 Hz, Schaltfrequenz 4 kHz  
Zwischenkreisspannung  $\sqrt{2} \cdot 440 \text{ V} = 622 \text{ V}$
- Die Umrichternennleistung wird nach der Tabelle A1 aus der Norm IEC 61800-9-2:2017 entsprechend der geforderten Nennwirkleistung ausgewählt.
- Der Modulationsindex wird aus der Zwischenkreisspannung und der Netz- bzw. maschinenseitigen Spannung berechnet.

Damit erhält man folgende Verluste für den Rückspeisebetrieb bei negativer Nennleistung an der Maschinenwelle und einer Drehzahl von 1500 U/Min.

$\eta$ .....Wirkungsgrad im generatorischen Betrieb

$P_N$ [kW]	$\eta$ [%]
0.37	86.1
1.1	88.0
1.5	88.2
7.5	93.5
22	95.0
30	95.3

**Tabelle 13: Abschätzung für den generatorischen Wirkungsgrad bei Nennleistung an der Welle**

Diese Art der Abschätzung liefert für den Teillastbetrieb pessimistische Werte und ist als Untergrenze anzusehen. Ohne Kenntnis von Drehzahl und Drehmoment in Abhängigkeit der von der Turbine angebotenen mechanischen Leistung ist eine genauere Beschreibung der Verluste und des Wirkungsgrads insbesondere im Teillastbereich nicht möglich.

Eine ähnliche Vorgangsweise wird für die Behandlung der Verluste der Umrichter angewandt. Für die Verluste im Betriebspunkt 100% Nenndrehzahl (1500 U/Min), - 100% Nennmoment (generatorischer Betrieb) liefert das Referenzmodell aus IEC 61800-9-2:2017 zusammen mit den Verlusten aus Tabelle 13 folgende Verluste.

$P_N$	$P_{V\text{umrichter}}$	$P_{V\text{generator}}$	$P_{V\text{gesamt}}$	$\eta_{\text{gesamt}}$
[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
0.37	0.15	0.05	0.20	45.5
1.1	0.193	0.132	0.325	70.4
1.5	0.218	0.176	0.394	73.7
7.5	0.641	0.488	1.128	85.0
22	1.451	1.108	2.559	88.4
30	1.883	1.420	3.303	89.0

**Tabelle 14: Verluste des Umrichters  $P_{V\text{umrichter}}$ , der elektr. Maschine  $P_{V\text{generator}}$ , Gesamtverluste  $P_{V\text{gesamt}}$  und sich daraus ergebender Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{gesamt}}$  im generatorischen Nennpunkt**

Die Abschätzung der Umrichterverluste anhand der Norm IEC 61800-9-2:2017 ist für nicht-rückspeisefähige Umrichter als Referenz zu betrachten und legt die Effizienzklasse IE1 fest. Diese so berechneten Verluste werden von den am Markt erhältlichen nicht rückspeisefähigen Umrichtern deutlich unterboten, welche meist der Effizienzklasse IE2 genügen. Daher ist auch die hier durchgeführte Abschätzung der Verluste der rückspeisefähigen Umrichter sehr pessimistisch und führt zu einer Untergrenze für die erzielbare Jahresenergie. Für die folgenden Betrachtungen wurde die Nennleistung der Generatoren so ausgewählt, dass möglichst viel der angebotenen Energie der Umwandlung zugeführt wird. Dies nimmt keine Rücksicht auf den schlechten Wirkungsgrad im Teillastbereich, in dem die meiste Energie angeboten wird. Die Verlustabschätzung ist speziell im Bereich kleiner Leistungen zu grob dafür. Aber man kann in Tabelle 15 und Tabelle 16 sehen, dass man bei Auswahl einer geringeren Nennleistung, mit der hier verwendeten Verlustabschätzung höhere Jahresenergien erreicht.

Die angebotene Turbinenleistung wird auf die zugeordnete Generatornennleistung begrenzt. Dann wird davon, unabhängig vom Betriebspunkt, immer dieselbe Verlustleistung entsprechend Tabelle 14 abgezogen. Ist die Verlustleistung größer als die angebotene Turbinenleistung, so wird die Rückspeiseleistung auf 0 gesetzt.

$$P_{\text{Netz}} = \max(0, \min(P_N, P_{\text{Turbine}}) - P_{V\text{gesamt}})$$

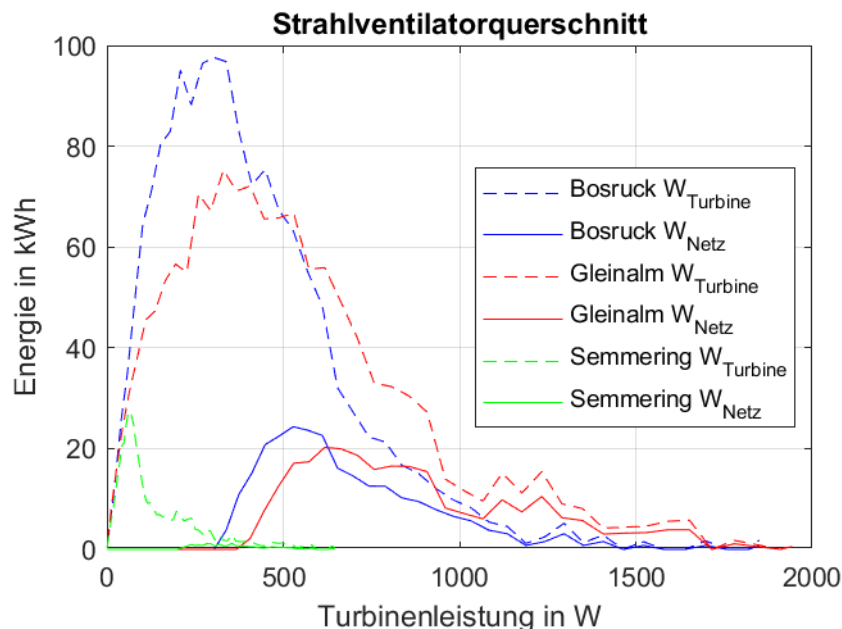
**Gleichung 10**

Die verbleibenden Leistungen werden mit der Dauer ihres Auftretens multipliziert und aufsummiert zur Jahresenergie (Ergebnisse siehe Tabelle 8 und Tabelle 11).

An der Welle zwischen Turbine und Generator tritt die mit einem Turbinenwirkungsgrad  $\eta_T = 0.7$  aus der Luftströmung umgewandelte Turbinenleistung auf. Multipliziert man diese Leistung mit der Dauer ihres Auftretens, so erhält man die an der Welle auftretende Energie  $W_{\text{Turbine}}$ . Diese mechanische Energie wird unter Verlusten in elektrische Energie umgewandelt. Die schließlich am Netzanschluss des rückspeisefähigen Umrichters einspeisbare Energie wird als  $W_{\text{Netz}}$  bezeichnet.

Abbildung 16 zeigt für einen einzelnen Strahlventilator die aerodynamisch über die Welle angebotene Turbinenarbeit (strichliert) und die elektrotechnisch realisierbare und ins Netz einspeisbare Arbeit. Aufgrund der für den Teillastbereich zu hoch angenommenen Eigenverluste scheint praktisch der gesamte Niederlastbereich für eine elektrische Nutzung wegzufallen.

Abbildung 17 zeigt das Verhältnis zwischen angebotener und nutzbarer Arbeit bei einer Installation von Turbinen in einem Luftkanal und Abbildung 18 bei Nutzung der Schachtströmungen bei quergelüfteten Tunneln.



**Abbildung 16: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie  $W_{\text{Turbine}}$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie  $W_{\text{Netz}}$ ) für eine Turbine mit Strahlventilatorquerschnitt**



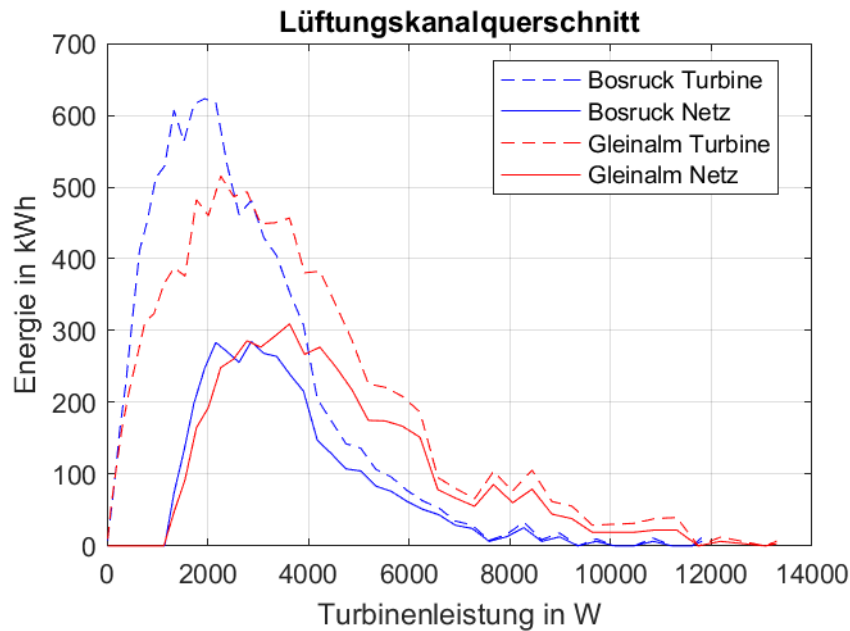


Abbildung 17: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie  $W_T$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie  $W_{\text{Netz}}$ ) für eine Turbine mit Lüftungskanalquerschnitt

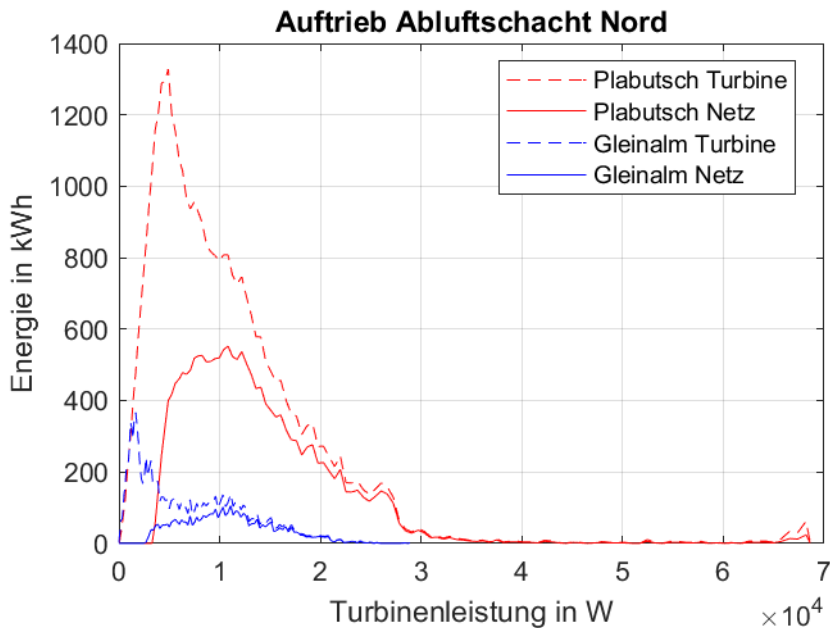


Abbildung 18: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie  $W_{\text{Turbine}}$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie  $W_{\text{Netz}}$ ) für eine Turbine im Abluftschacht

Da die durch Abtrieb in den Abluftschächten erzielbare Jahresenergie an der Turbinenwelle für den Gleinalmtunnel 4 % und für den Plabutschtunnel 1.5 % von der durch Auftrieb erzielbaren Jahresenergie ausmacht, wurde dieser Anteil nicht berücksichtigt.

Am Beispiel des Abluftschachtes Plabutsch Süd zeigt Tabelle 15, dass in der Anpassung der Nennleistung der Generator-Umrichter Kombination ein gewisses Optimierungspotenzial vorhanden ist.

$P_N$	Jahresenergie
kW	kWh
2.2	4973
3	5056
4	4714
5	4161
7.5	3545

**Tabelle 15: Durch Anpassung der Nennleistung von Umrichter und Generator kann der Jahresertrag der im Abluftschacht Süd des Plabutschtunnels anfallenden Windenergie besser ausgenutzt werden**

Da über den Teillastbetriebsbereich nichts bekannt ist, ist es das Ziel der Zuordnung der Nennleistungen in Tabelle 12, möglichst viel der angebotenen Leistung der elektromechanischen Energiewandlung zuzuführen. Tabelle 15 zeigt die Anpassungsmöglichkeit anhand der Leistungsabstufung aus der Normmotorenreihe. Dies wurde auch für die anderen in Tabelle 12 angeführten Tunnel und Positionen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 dargestellt und fließen in Tabelle 17, Tabelle 18 und Tabelle 19 der Zusammenfassung ein.

Tunnel	Bosruck		Gleinalm		Semmering	Gleinalm	Plabutsch
Ort	SV	LK	SV	LK	SV	Abluftschacht Nord	Abluftschacht Nord
$P_{N,opt}$ [kW]	0.55	3	0.75	4	0.370	7.5	11
$W_{J,opt}$ [kWh]	344	5323	385	5079	18	5545	24538
$W_{J-anteil}$ [%]	95.5	92.8	95.8	91.6	99.2	89.5	90.5

**Tabelle 16: Anpassung der Nennleistung von Umrichter und Generator  $P_{N,opt}$  entsprechend der Normmotorenreihe, um den dieser Verlustabschätzung entsprechenden maximalen Jahresertrag  $W_{J,opt}$  zu erzielen. Dabei wird der Anteil  $W_{J-anteil}$  der an der Welle angebotenen Jahresenergie der elektromechanischen Energieumwandlung zugeführt.**

Die Nutzung bestehender Abluftventilatoren mit den zugehörigen Asynchronmaschinen für einen generatorischen Betrieb wurden aufgrund negativer Aussagen von namhaften Ventilatorherstellern zur Machbarkeit und wegen der Nennleistungen der Bestandsmaschinen, die um den Faktor 10 größer sind als die erwartbaren Leistungen, nicht weiter untersucht.

## **8 NOTWENDIGE BAULICHE UND OPERATIVE MAßNAHMEN**

Gänzlich unbeachtet blieben bisher eventuell notwendige bauliche Maßnahmen. Während bei der inversen Nutzung von existierenden Strahlventilatoren auf Bestandsinstallationen zurückgegriffen werden könnte, ist dies bei allen anderen Anwendungen nicht der Fall.

### Nutzung von Längsströmungen bei Tunnel mit Zwischendecke:

Bei Tunnel mit Zwischendecke lässt sich der Luftkanal theoretisch als offene Verbindung zwischen den beiden Portalen nutzen. Etwaige Kanalabschlusswände wären zu entfernen und die Luftaustrittsstelle baulich an die Ventilatorgeometrie anzupassen. Etwaige querschnittsverengende bauliche Gestaltungen sind aufgrund des dabei zu erwartenden erhöhten Widerstandes zu vermeiden. Eine kostenmäßige Abschätzung derartiger baulichen Anpassungen erfolgt im Rahmen dieses Projektes nicht.

### Nutzung von Auftriebsströmungen in Vertikalschächten:

Eine direkte Nutzung bestehender Zu-/Abluftventilatoren im Turbinenbetrieb ist nicht angedacht. Rückfragen bei namhaften Lüfterherstellern ergaben, dass diese ihre Axiallüfter als nicht geeignet für einen sinnvollen Einsatz im Turbinenbetrieb betrachten. Dies führt dazu, dass eigene Turbinen in den Schächten vorzusehen wären, was zu merklichen baulichen Aufwänden führen würde. Nachdem der Querschnitt des zur Verfügung stehenden Kanals im Regelfall nicht kreisförmig ist, muss hier eine bauliche Anpassung erfolgen. Zudem ist darauf zu achten, dass bei Nutzung des Abluftschachtes die Anforderungen an Maschinen im Abluftkanal erfüllt sein müssen oder diese gegebenenfalls im Bypass-Betrieb im Brandfall betrieben werden müssen.

Bei Nutzung des Zuluftkanals (Vollquerlüftung) entfallen Einschränkungen bezüglich Temperaturbeständigkeit. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass vor betriebsbedingter Aktivierung der Zuluft (z.B. im Brandfall zu Regelungszwecken) erst eine Deaktivierung der Turbine und eine Richtungsumkehr der Luftströmung erfolgen muss. Dadurch wird die Zeitspanne zwischen Detektion eines Brandes und richtlinienkonformer Zustand der

Lüftungsanlage (Erreichung des Lüftungsziels) merklich erhöht, wodurch die Sicherheit der Tunnelnutzer während der kritischen Selbststrettungsphase reduziert wird.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

### 9.1 Grundlegende Bemerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes Tunnelkraftwerk (Förderprogramm Mobilität der Zukunft MdZ-VIT, FFG Projekt 893655) waren Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln zur Stromproduktion zu untersuchen. Die ursprüngliche Aufgabenstellung sah vor unter Zugrundelegung bestimmter Luftgeschwindigkeiten im Tunnel bzw. einem Luftschacht die Potenziale der Umwandlung von druckindizierten Strömungen in elektrische Energie zu bewerten. Nachdem nun jedoch der Wert der Längsgeschwindigkeit in einem Kanal (Tunnel bzw. Schacht) von vielen Faktoren abhängt, wurde die Fragestellung im Rahmen des Projektes unter Einbindung der Vertreter:innen der Fördergeber so erweitert, dass in einem ersten Schritt eine Potenzialanalyse für Standardtunnel (2-streifiger Querschnitt) mit unterschiedlichen Längen und meteorologischen Druckdifferenzen durchgeführt wurde. In einem zweiten Schritt wurden dann für österreichische Tunnelanlagen die treibenden Druckdifferenzen zwischen Portalen bzw. über Schächte erhoben und für ausgewählte Anlagen die mögliche nutzbare Jahresenergie berechnet.

Vorweg ist anzumerken, dass Luftströmungen, die durch den sogenannten Kolbeneffekt von fahrenden Fahrzeugen bewirkt werden, nicht berücksichtigt wurden. In so einem Fall würde es lediglich zu einer Umwandlung von mit Fahrzeugantrieben generierten Luftströmungen in eine elektrische Energie kommen. D.h. das Fahrzeug muss – mit im Allgemeinen schlechten Wirkungsgrad – eine Luftströmung erzeugen, die in weiterer Folge dann wieder mit Verlusten in elektrische Energie umgewandelt werden würde. Somit würde letztendlich nur Exergie vernichtet bzw. in Anergie umgewandelt werden.

Die Leistung einer Turbine ist proportional zum diese Maschine durchströmenden Volumenstrom und der über die Maschine abgebauten Druckdifferenz. Somit ergibt sich bei einer Kanalströmung ein kubischer Zusammenhang zwischen Luftgeschwindigkeit und Leistung bzw. ein Zusammenhang zwischen Leistung und anstehender Druckdifferenz<sup>3/2</sup> sowie einem vom Strömungswiderstand im Tunnel abhängigen Proportionalitätsfaktor. Aus dieser Beziehung lässt sich ableiten, dass je höher die Druckdifferenzen zwischen den

Portalen bzw. über Schächte und je kürzer der Tunnel/Kanal ist, desto höher ist die mögliche generierbare elektrische Leistung.

Dies steht im Widerspruch zur Realität, da hohe meteorologisch bedingte Druckdifferenzen ausschließlich bei Tunneln auftreten, die einen größeren Gebirgszug unterqueren. Bei thermisch getriebenen Strömungen bedarf es Schächte mit entsprechenden Höhen, um eine relevante Energiemenge umwandeln zu können.

Weiters ist anzumerken, dass der Leistungsbedarf der bestehenden Ventilatoren (bei Strahlventilatoren im Bereich von 30 bis 90 kW, bei Axialmaschinen im Bereich von 100 bis 800 kW) um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher liegt als jener, der bei Turbinenbetrieb (zwischen wenigen Watt und wenigen 10 kW) anfällt. Somit wäre der derzeit vorhandene elektrische Maschinenteil (Motor, Umrichter etc.) aufgrund der Eigenverluste in dessen Teillastbereich für einen wirtschaftlichen Generatorbetrieb ungeeignet. Zudem werden derzeit von den Herstellern der Ventilatoren keinerlei Eigenschaften für den Betrieb als Turbinen spezifiziert.

## **9.2 Generierbare Jahresenergiemenge**

Die Berechnung der Jahresenergiemengen erfolgte auf Basis real vorherrschender Druckdifferenzen bei Tunnelanlagen im österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz. Anhand der vorliegenden Messdaten wurden jene Tunnelanlagen für eine weitere Betrachtung ausgewählt, die eine höhere bis hohe meteorologisch bedingte Druckdifferenz aufweisen.

### **9.2.1 Längsgelüftete Tunnel (ausschließlich Strahlventilatoren)**

Für eine relativ große Zahl an längsgelüfteten Tunneln lagen meteorologische Daten in entsprechender Qualität vor. Aus diesem Konvolut wurden jene Tunnel ausgewählt, die die jeweils höchsten meteorologischen Druckdifferenzen aufwiesen. Tabelle 17 gibt die möglichen Jahresenergiemengen an, die bei Nutzung der bestehenden Strahlventilatoren (mit gänzlich anderem elektrischen Maschinenteil) zu erzielen wären.

Tunnel	Leistung pro Ventilator im Jahresmittel [kW]	Anzahl Ventilatoren [-]	Jahresenergie theoretisch * [kWh]
Kalcherkogel	0.003	10	260
Semmering	0.002	14	252
Arlberg <sup>#</sup>	0.02	3	521
Bosruck <sup>#</sup>	0.039	10	3440
Gleinalm <sup>#</sup>	0.044	14	5390
Karawanken <sup>#</sup>	0.016	14	1985

\* Gem. Betzschem Gesetz maximal 60% davon generierbar

# Voll/Halbquergelüftete Tunnel: Nutzung der Strahlventilatoren im Fahrraum

#### **Tabelle 17: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge Längslüftung**

Basierend auf der Analyse kann geschlossen werden, dass bei ausschließlich mit Strahlventilatoren belüfteten Tunneln selbst bei Nutzung aller vorhandenen Strahlventilatoren in einem Turbinenbetrieb eine Jahresenergiemenge von im Bestfall<sup>9</sup> ohne Berücksichtigung des Betzschen Gesetzes. 260 kWh als Strom umgesetzt werden könnten.

Bei halbquergelüfteten Tunnel könnte aufgrund der größeren Druckdifferenzen zwischen den Portalen und der größeren Lüfterquerschnitte im Bestfall (ohne Berücksichtigung des Betzschen Gesetzes) ca. 5390 kWh an Strom umgesetzt werden.

#### **9.2.2 Tunnel mit durchgehendem Luftkanal (Halbquerlüftung) und Nutzung der Längsgeschwindigkeit**

Bei diesen Tunneln handelt es sich um Anlagen mit einem zwischen den beiden Portalen durchgehenden Kanal. Somit könnte, die notwendigen Umbauten vorausgesetzt, theoretisch die an den Portalen anstehende Druckdifferenz genützt werden. Tabelle 18 gibt die möglichen Jahresenergiemengen an, die bei Nutzung der meteorologisch bedingten

<sup>9</sup> Bestfall im Sinne der Werte in der Tabelle. Seitens der aerodynamische Betrachtung wurden optimistische Angaben getroffen, seitens der elektrotechnischen Seite wurden die durch die Normen vorgegebenen Mindestwirkungsgrade angesetzt. Hier ist in der Realität ein höheres Potenzial zu erwarten.

Druckdifferenzen zwischen den Portalen und optimal dimensionierten Turbinen zu erzielen wären.

Tunnel	Leistung im Jahresmittel [kW]	Jahresenergie [kWh]
Arlberg	0.22	1943
Bosruck	0.61	5323
Gleinalm	0.58	5079
Karawanken	0.19	1645

**Tabelle 18: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge, Längsströmung in Luftkanal**

Basierend auf der Analyse kann geschlossen werden, dass bei Nutzung des Luftkanals und Installation einer Turbine im Luftkanal eine Jahresenergiemenge von im Bestfall<sup>9</sup> (Bosrucktunnel) ca. 5325 kWh als Strom erreicht werden könnten.

### 9.2.3 Tunnel mit Querlüftung, Nutzung der Schachtströmungen

Bei quergelüfteten Tunnel mit hohen Schächten bietet sich die Möglichkeit an, thermisch bedingte Auftriebsströmungen energetisch zu nutzen. Tabelle 19 gibt die möglichen Jahresenergiemengen an, die bei Nutzung des Schachtauftriebes und optimal dimensionierten Turbinen zu erzielen wären.

Tunnel	Schachthöhe [m]	Leistung im Jahresmittel [kW]	Jahresenergie [kWh]
Gleinalm Nord*	366	0.63	5545
Gleinalm Süd*	287	0.30	2628
Arlberg Albona	778	2.20	19272
Arlberg Maienwasen	260	0.50	4380
Plabutsch Nord*	240	2.80	24538
Plabutsch Süd*	90	0.58	5056

\* Jahresenergiemengen hochgerechnet aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit

**Tabelle 19: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge, Nutzung von Auftriebsströmungen**

Erwartungsgemäß ist bei dieser Anlagenkonfiguration der Anteil der in Strom umwandelbaren Jahresenergie gegenüber den anderen Formen der höchste. Naturgemäß sind da aber auch die baulichen Eingriffe am höchsten. Beim Albona Schacht des Arlbergtunnels stehen zwar die höchsten Druckdifferenzen an, die Nutzbarkeit dieses Schachtes für eine Stromerzeugung ist jedoch aufgrund des notwendigen Lüftungsbetriebes nur eingeschränkt möglich. Somit wirkt sich das auf die Jahresenergiemenge negativ aus. Interessanterweise ergibt sich für den Plabutschtunnel Nordschacht ein hohes Potenzial, was auf die hohe Querschnittsfläche (hoher Volumenstrom) und die hohe Verfügbarkeit des Schachtes zurückzuführen ist. Anzumerken ist jedoch, dass die Berechnung der Jahresenergiemenge beim Plabutsch aber auch beim Gleinalmtunnel aufgrund des eingeschränkten Datenmaterials größeren Unsicherheiten unterworfen ist.

### 9.3 Resümee

Die in diesem Projekt gestellte Forschungsfrage zur Nutzung der druckindizierten Luftströmung einer Tunnel- bzw. Kanalströmung zur Umwandlung in elektrische Energie wurde anhand von Anwendungen an realen Tunnelanlagen untersucht.

Betrachtet wurden ausschließlich Strömungszustände, die sich aufgrund meteorologischer und/oder thermischer Differenzen zwischen Ein- und Austritt einstellen. Nicht berücksichtigt wurden Strömungszustände, die sich aufgrund von Fahrzeugbewegungen im Tunnel einstellen, da dies nur einen Energietransfer vom Fahrzeug über die Luftströmung zu einer Nutzung in einer Turbine darstellt und somit gesamtheitlich betrachtet immer ein Exergieverlust eintritt.

Aus den angeführten Betrachtungen kann wie folgt geschlossen werden:

Elektro- und maschinentechnische Einrichtungen: Die derzeit vorhandenen Lüftungstechnischen Einrichtungen sind nicht für einen Betrieb zur Erzeugung von Strom geeignet. Derzeitige in den Tunneln installierte Strahlventilatoren haben einen elektrischen Leistungsbedarf im Bereich von 30 bis 90 kW. Dem steht gegenüber, dass bei Nutzung als Turbine eine elektrische Leistung im Bereich von einigen Watt bis ca. 1 kW anfallen würde. Bei Nutzung der bestehenden Querlüftungsanlagen (Axialventilatoren) liegt derzeit der Leistungsbereich (Nennleistung) der Abluftventilatoren zwischen 100 und 800 kW. Bei generatorischem Betrieb würden hier Leistungen im Bereich von < 1kW bis wenige 10 kW anfallen. Somit ist der bestehende elektrische Teil (Motor, Umrichter, etc.) für einen



generatorischen Betrieb gänzlich überdimensioniert, wodurch die Verlustleistungen das vorhandene Energieangebot zu den meisten Zeiten übersteigen würde.

Längsgelüftete Tunnel: Meteorologisch bedingte Druckdifferenzen zwischen Portalen bewirken zwar Luftströmungen in Tunneln, will man diese energetisch nutzen, so sind im Bestfall der untersuchten Tunnel Jahresenergiemengen von ca. 260 kWh und nur im Fall der alpenquerenden langen Tunnel zwischen 3000 bis 5400 kWh zu erwarten. Dies entspricht in etwa dem jährlichen Stromverbrauch von einem Zweipersonen-Haushalt. Der zur energetischen Nutzung dieser Energie notwendige elektro- und maschinentechnische Aufwand überschreitet diesen Nutzen.

Sollte eine Nutzung der Längsströmung im Tunnel zur Stromproduktion weiterverfolgt werden, so ist steuerungs- und messtechnisch sicherzustellen, dass nur die „Überschussenergie“, d.h. jener Anteil, der über den durch den Fahrzeugschub erzeugtem, liegt, abgeschöpft wird.

Tunnel mit Zwischendecke und durchgehendem Lüftungskanal: Bei diesen Tunnelanlagen steht theoretisch eine größere Querschnittsfläche und somit ein höherer Volumenstrom zur Nutzung zur Verfügung. Die Analysen zeigten, dass dadurch maximal eine jährliche Energiemenge von rund 5300 kWh erzielt werden könnte. Da für derartige Anlagenkonfigurationen nicht auf Bestandsanlagen zurückgegriffen werden kann und zudem auch relevante bauliche Aufwände anfallen würden, erscheint eine Weiterverfolgung dieser Idee derzeit nicht zielführend.

Nutzung von Luftschächten (quergelüftete Tunnel): Bei diesen Anwendungen ist das Potenzial merklich höher. Zu beachten ist jedoch inwieweit ein Lüftungsschacht für derartige Nutzungen überhaupt zur Verfügung steht. Bei hohen Verfügbarkeiten, wie dies bei Abluft-Halbquerlüftungen in der Regel der Fall ist – könnten z.B. beim Plabutschunnel Nordschacht bei Nutzung des Abluftschachtes ca. an die 24500 kWh jährlich umgesetzt werden. Zu beachten ist jedoch, dass in derartigen Anwendungsfällen der bauliche Aufwand wahrscheinlich am höchsten ist. Eine Nutzung der Bestandsventilatoren im Turbinenbetrieb scheint nicht machbar.

Vergleichsbasis: Nimmt man den Stromverbrauch eines durchschnittlichen 2-Personenhaushalts (inkl. Warmwasseraufbereitung) rund 3000 kWh pro Jahr ([www.stromliste.at](http://www.stromliste.at), Zugriff 9.2.2023) her, so lässt sich das Potenzial der durch Kanalströmungen generierbaren Jahresstrommenge einordnen.

Sicherheits- und steuerungsrelevante Aspekte:

Bei einer weiteren Verfolgung dieser Idee bei quergelüfteten Tunneln sind sicherheitstechnische Aspekte in die Betrachtung mit einzubeziehen. Gemäß österreichischer Vorschriften ist das Lüftungsziel bei einem Brandfall innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens ab Branderkennung zu erreichen. Dieser kurze Zeitraum ist notwendig, um während der Selbstrettungsphase eine undefinierte Rauchausbreitung im Tunnel weitestgehend zu vermeiden. Wird nun ein Lüftungselement und oder ein Schacht bzw. Kanal für andere Zwecke benötigt, so ist der notwendige Zeitraum zur Herstellung der notwendigen Ausgangssituation für einen Brandbetrieb sicherheitstechnisch in der Risikoanalyse zu betrachten und bewerten.

#### Einschränkungen:

- Die abgeleiteten Erkenntnisse beruhen auf Daten, die bei österreichischen Tunnelanlagen gemessen wurden. Vor allem bei den Luftschächten liegen nur Messungen über eingeschränkte Perioden vor, sodass hier zur Abschätzung der Jahresenergiemengen Annahmen getroffen wurden, die einer Verifizierung bedürfen.
- Bezüglich Wirkungsgrade in der Stromerzeugungskette (von der Turbine zur Schnittstelle Stromnetz) wurden vereinfachende Annahmen getroffen. Es wurde von Werten ausgegangen, die gemäß normativen Vorgaben mindestens erreicht werden müssen. Bei realen elektrischen Anlagen sind geringere Verluste zu erwarten, wodurch eine etwas höhere Jahresleistung pro Anlage erwartbar ist.
- Die Angaben beziehen sich auf eine theoretische Maschinenwahl. Bei Installationen eigens auf das vorliegende Leistungspotenzial abgestimmter Kleinwindkraftanlagen (Turbinen) lässt sich hier möglicherweise eine etwas höhere Ausbeute erzielen.
- Die Angaben beziehen sich auch auf optimierte, widerstandsarme strömungstechnische Gegebenheiten bei Kanal- und Schachtströmungen. So wurden z.B. Einströmverluste über etwaige Abluftklappen, Umlenkungen im Luftweg usw. in den Abschätzungen nicht betrachtet. Diese wären projektspezifisch zu erheben und in einer Vorplanung zu berücksichtigen.

Bei Weiterverfolgung der Idee einer Energienutzung aus Tunnelströmungen wäre zu allererst die Datenbasis zu vervollständigen. Des Weiteren wären tiefere Untersuchungen über die Umsetzung von druckindizierten Strömungen in elektrische Energie bei Kanalströmungen in einem großen Variations- bzw. Drehzahlbereich einer Maschine notwendig.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die Idee einer Verstromung druckindizierter Luftströmungen in einem Tunnel mit ausschließlicher Längslüftung beim Großteil der Straßentunnel nicht sinnvoll umsetzbar erscheint. Bei hohen Vertikalschächten, die ausschließlich im Brandfall genutzt werden, ist das theoretische Potenzial zur Nutzung der Auftriebsströmungen merklich höher (vgl. Plabutsch Nordschacht). Will man diesen Pfad weiterverfolgen, wäre eine vertiefende strömungstechnische Untersuchung unter Einbeziehung realer Luftwege von Tunnelfahrraum bis Schachtaustritt sowie über die notwendigen baulichen und maschinentechnischen Einrichtungen – inklusive sicherheitstechnischer Aspekte – im Rahmen einer konkreten Pilotuntersuchung notwendig.

## 10 VERZEICHNISSE

### 10.1 Literaturverzeichnis

ASFINAG, 2013. *Planungshandbuch Tunnel - Lüftung*, Wien: ASFINAG.

Betz, A., 1920. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, Band Heft 26.

Kovacevic, P., 2023. *Energetische Nutzung natürlicher Strömungsvorgänge in Straßentunneln*, Bachelorarbeit, Graz: Technische Universität Graz, ITnA.

Schaffarczyk, A. P., 2014. *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Berlin: Springer Verlag.

### 10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Theoretisch erzielbare Turbinenleistung als Funktion der Druckdifferenz und der Tunnellänge.....	15
Abbildung 2: dynamische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A9 im OÖ Alpenvorland, R1 = N-S, R2 = S-N Richtung.....	20
Abbildung 3: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A2 im Packabschnitt, R1 = W-O, R2 = O-W Richtung.....	20
Abbildung 4: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der S6 im Mürztal, R1 = W-O, R2 = O-W Richtung – Ausnahme Tanzenbergtunnel R1 = S-N, R2 = N-S.....	21
Abbildung 5: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der S36 im Murtal und der A9 im Raum Graz, R1 = N-S, R2 = S-N.....	22
Abbildung 6: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen entlang der A10 in Kärnten, Trebesing: R1 = S-N, R2 = N-S Richtung; Oswaldiberg: R1 = W-O, R2 = O-W Richtung.....	23
Abbildung 7: Barometrische Druckdifferenzen zwischen den Portalen Alpen-querender Tunnel; R1 = S-N, R2 = N-S Richtung; Ausnahme Karawanken- und Arlbergtunnel: keine getrennte Betrachtung der Richtungen.....	24

Abbildung 8: Perzentil Werte des Auftriebsdruckes [Pa] in Schächten, unterschiedliche Messzeiträume; Achtung: unterschiedliche Auswertezeiträume!.....	25
Abbildung 9: Histogramm des Auftriebsdruckes [Pa] im Nordschacht des Gleinalmtunnels für den Zeitraum November 2009, y-Achse entspricht der Anzahl von Dreiminuten-Mittelwerten .....	26
Abbildung 10: Drehfeldmaschine direkt am Wechselspannungsnetz der Spannung U1 und der Frequenz f1 .....	27
Abbildung 11: Antrieb mit nichtrückspeisefähigem Umrichter, bestehend aus netzseitigem Gleichrichter, Gleichspannungszwischenkreis ( $U_{DC}$ ) und maschinenseitigem Umrichter. .	27
Abbildung 12: Antrieb mit rückspeisefähigem Umrichter, bestehend aus netzseitigem Umrichter, Gleichspannungszwischenkreis ( $U_{DC}$ ) und maschinenseitigem Umrichter. ....	28
Abbildung 13: Meteorologisch bedingte Portaldruckdifferenzen als 95% Perzentil bei zweiröhrigen Tunneln.....	29
Abbildung 14: Portaldruckdifferenzen ausgewählter Tunnelanlagen .....	30
Abbildung 15: Histogramm der Druckdifferenzen an ausgewählten Tunnelanlagen, y-Achse entspricht der Anzahl von Halbstunden-Mittelwerten.....	32
Abbildung 16: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie $W_{Turbine}$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie $W_{Netz}$ ) für eine Turbine mit Strahlventilatorquerschnitt .....	48
Abbildung 17: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie $W_T$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie $W_{Netz}$ ) für eine Turbine mit Lüftungskanalquerschnitt.....	49
Abbildung 18: Mechanisch an der Welle angebotene (strichlierte Linie $W_{Turbine}$ ) und ins Netz einspeisbare Energie (durchgezogene Linie $W_{Netz}$ ) für eine Turbine im Abluftschacht.....	49

### 10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Studie verwendete Parameter für die aerodynamische Betrachtung des Tunnels.....	14
--	----

Tabelle 2: Auflistung der Tunnelanlagen mit auswertbaren Daten zu meteorologischen Druckdifferenzen.....	18
Tabelle 3: Portaldruckdifferenzen ausgewählter Tunnelanlagen .....	30
Tabelle 4: Tunnelspezifische Eingangsdaten zur Abschätzung der erzielbaren Turbinenleistung .....	33
Tabelle 5: Theoretisch generierbare Leistung in kW, berechnet mit dem 5 und dem 98 Perzentil der Druckdifferenzen .....	34
Tabelle 6: Theoretisch generierbare Leistung im Jahresmittel sowie theoretisch maximal erzielbare Jahresenergiemenge.....	36
Tabelle 7: Generierbare Leistung in kW, berechnet mit dem 5 und im 98 Perzentil der Druckdifferenzen, elektrischer Wirkungsgrad für alle angegebenen Leistungen angenommen $\eta_{\text{elektrisch}}=0,75$ .....	37
Tabelle 8: Generierbare, verlustbehaftete Leistung im Jahresmittel sowie verlustbehaftete Jahresenergiemenge .....	38
Tabelle 9: Verhältnisse der Auftriebsdruck-Mittelwerte in der warmen und kalten Messperiode .....	40
Tabelle 10: Tunnelspezifische Eingangsdaten zur Abschätzung der Jahresenergie .....	40
Tabelle 11: Generierbare Leistung im Jahresmittel sowie erzielbare Jahresenergiemenge, berechnet für den Querschnitt des jeweiligen Abluftschachtes.....	43
Tabelle 12: Maximale Turbinenleistung $P_{\text{max}}$ (bei Turbinenwirkungsgrad $\eta_{\text{Turbine}} = 0.7$ ) und ausgewählte Generatorenleistung $P_N$ .....	44
Tabelle 13: Abschätzung für den generatorischen Wirkungsgrad bei Nennleistung an der Welle .....	46
Tabelle 14: Verluste des Umrichters $P_{\text{Vumrichter}}$ , der elektr. Maschine $P_{\text{Vgenerator}}$ , Gesamtverluste $P_{\text{Vgesamt}}$ und sich daraus ergebender Gesamtwirkungsgrad $\eta_{\text{gesamt}}$ im generatorischen Nennpunkt.....	47
Tabelle 15: Durch Anpassung der Nennleistung von Umrichter und Generator kann der Jahresertrag der im Abluftschacht Süd des Plabutschunnels anfallenden Windenergie besser ausgenutzt werden.....	50

Tabelle 16: Anpassung der Nennleistung von Umrichter und Generator $P_{N,opt}$ entsprechend der Normmotorenreihe, um den dieser Verlustabschätzung entsprechenden maximalen Jahresertrag $W_{J,opt}$ zu erzielen. Dabei wird der Anteil $W_{J-anteil}$ der an der Welle angebotenen Jahresenergie der elektromechanischen Energieumwandlung zugeführt.....	50
Tabelle 17: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge Längslüftung.....	54
Tabelle 18: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge, Längsströmung in Luftkanal.....	55
Tabelle 19: Zusammenfassende Betrachtung Jahresenergiemenge, Nutzung von Auftriebsströmungen.....	55