

Optimierung des Energieverbrauchs, der Kosten sowie der Klimawirkung beim Bau und Betrieb von Bahntunnel

Schlussbericht im Projekt «Graue Energie Bahntunnel» (GrETu)
27. Februar 2023



Projektteam (nach Firma und in alphabetischer Reihenfolge)

EBP Schweiz AG (Hauptauftragnehmerin):

Salem Blum
Isolde Erny
Nathalie Flury
Matthias Kruse
Peter Locher
Oliver Schweizer
Andy Spörri

DB Systemtechnik AG (Unterauftragnehmerin):

Benjamin Balázs
Hans-Joachim Wormstall-Reitschuster
Peter Deeg

Kontakt Hauptauftragnehmerin:

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Schweiz
Telefon +41 44 395 16 16
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Druck: 17. April 2023
2023-02-27_GrETu_Schlussbericht.docx

Titelbild: Zur Verfügung gestellt von Stephan Husen (BAV)

Dokumentengeschichte

Version	Autor	Datum	Bemerkungen
0.5	LO/OSC	23.12.2021	Erster, noch unvollständiger Entwurf an BAV
0.6	LO/OSC	02.03.2022	Rückmeldungen von BAV integriert, Ergänzungen
1.0	LO/OSC	27.02.2023	Vollständige Version

DB Systemtechnik GmbH hat das Modell zur Berechnung des Tunnelfaktors in Form einer Excel-Datei beigesteuert, welches ins Excel-Modell integriert wurde und im Anhang A6.3.2 beschrieben ist. DB Systemtechnik lieferte zudem einzelne Parameter, um die Traktionsenergie zu ermitteln.

Für den Inhalt des vorliegenden Berichts ist jedoch EBP Schweiz AG alleine verantwortlich.

Management Summary

Ein wichtiger Entscheid bei der Planung von Bahntunneln betrifft die Festlegung des Tunnelquerschnitts. Mit zunehmendem Tunnelquerschnitt sinkt der Luftwiderstand für die durch den Tunnel verkehrenden Züge. Dem Bundesamt für Verkehr, als für die Planung von Bahntunneln federführender Behörde, fehlen derzeit belastbare Grundlagen, um eine langfristig optimale Wahl des Querschnitts von Bahntunneln zu gewährleisten. Bei dieser Optimierung stellen sich insbesondere zwei Fragenkomplexe:

- Minimierung der Lebenszyklus-Kosten: Lohnt sich eine Vergrösserung des Tunnelquerschnitts trotz der damit verbundenen höheren Baukosten, um im Betrieb Energie zu sparen und somit die Kosten für die Traktion über die Lebensdauer eines Tunnels zu mindern?
- Anstrengungen im Bereich Klimaschutz sowie Einfluss der Energiestrategie 2050: Welche Einflüsse auf die Festlegung des optimalen Tunnelquerschnitts können aus den beiden folgenden Zielen abgeleitet werden:
 - Reduktion der Treibhausgasemissionen und
 - Reduktion des Energieverbrauchs (insbes. elektrische Energie)?

Im Rahmen des Projekts «Graue Energie Bahntunnel» (GrETu) wurde ein umfassendes Modell entwickelt, um für Tunnel mit kreisförmigem Querschnitt belastbare Entscheidungsgrundlagen zur optimalen Grösse des Tunnelquerschnitts zu schaffen. Im Zentrum steht die Frage, ob der gemäss den geltenden Normen minimale Tunnelquerschnitt optimal ist oder ob er aus Gründen der Kostenminimierung, des Klimaschutzes oder zwecks Reduktion des Energieverbrauchs grösser gewählt werden sollte.

Im Modell werden für die Bau- und Betriebsphase, welche die relevanten Phasen im Lebenszyklus eines Tunnels darstellen, folgende Grössen bestimmt, welche für die Optimierung herangezogen werden:

- Verbrauch fossiler und elektrischer Energie (inkl. der grauen Energie für die Herstellung der erforderlichen Baumaterialien);
- Treibhausgasemissionen (inkl. der Emissionen, die mit den obigen Energieflüssen einhergehen);
- Gesamtkosten (inkl. der Kosten für den Energieverbrauch sowie monetarisierten Treibhausgasemissionen), diskontiert auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels.

Je nachdem, wie der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen bei den Gesamtkosten berücksichtigt werden, kann den Aspekten «Klimaschutz» und «Energiesparen» bei der Gesamtoptimierung eine unterschiedliche Bedeutung beigemessen werden. So ist es z.B. möglich, eine Zahlungsbereitschaft zur Reduktion der Traktionsenergie zu berücksichtigen, indem die Stromkosten «künstlich» erhöht werden.

Um die obigen Optimierungsgrössen quantitativ für einzelne Tunnel zu ermitteln, wurde ein Modell entwickelt, das auf zwei unterschiedlichen Gruppen von Parametern beruht:

- Modellparameter, die unabhängig vom zu bewertenden Tunnel sind, insbesondere:
 - Zahlreiche Einheitskosten für Bauprozesse (z.B. Vortrieb und Ausbruch Tunnelröhre) sowie den Einbau bzw. den Transport von Baumaterialien und die Entsorgung von Ausbruchmaterial. Der damit verbundene Energieverbrauch, inkl. der grauen Energie von Baustoffen, wird über eine Vielzahl von Energiekenngrößen ermittelt.
 - Parameter zu Berechnung der Traktionsenergie für eine repräsentative Auswahl von Zugtypen bzw. -formationen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit.
 - Zukünftiger Preis für die Produktion des erforderlichen Bahnstroms, gegebenenfalls erhöht um die Zahlungsbereitschaft, Strom einzusparen.
 - Diskontrate, mit der zukünftig anfallende Kosten auf den Zeitpunkt der Tunnelinbetriebnahme abdiskontiert werden.
 - Monetarisierung der Treibhausgasemissionen (CHF pro t CO₂-eq) in Form einer Zahlungsbereitschaft zur Minderung der Emissionen.
- Vom spezifischen Anwendungsfall abhängige Tunnelparameter:
 - Grundgrößen wie Tunnelsystem (Doppel- bzw. Einspur), Anzahl Röhren und wichtige geometrische Größen (z.B. Abstand Schienenoberkante zu Mittelpunkt Tunnelquerschnittsfläche).
 - Länge der Abschnitte, welche mit einer der üblichen Vortriebsmethoden (bzw. Bauverfahren) erstellt werden und zugehörige bauliche Merkmale. Daraus und aus den geometrischen Größen werden im Hintergrund automatisch erforderliche Baumaterialmengen etc. ermittelt.
 - Transportdistanzen für Baumaterialien und Ausbruchmaterial und verwendetes Transportmittel (z.B. Bahn, Strasse, Förderband).
 - Zahl der verkehrenden Züge (gegliedert nach definierten Zugtypen, für die die erforderlichen Modellparameter zur Ermittlung der Traktionsenergie ermittelt wurden).

Um das komplexe Modell effizient anwenden zu können, wurde ein Excel-Tool entwickelt. Den Autoren sind kein publizierter Ansatz und erst recht kein öffentlich zugängliches Tool bekannt, bei dem die Frage des optimalen Tunnelquerschnitts für ein breites Spektrum von Tunnel in ähnlichem Tiefgang untersucht wird.

Angesichts der Komplexität der Thematik lassen sich nur schwer generische Aussagen zum optimalen Tunnelquerschnitt machen. Die Stärke der Produkte aus dem Projekt GrETu liegend deshalb weniger in allgemeingültigen Ergebnissen, sondern in der Möglichkeit, während des Planungsprozesses ein belastbares Modell für die Entscheidungsfindung bzgl. des optimalen Tunnelquerschnitts einsetzen zu können.

Ausgehend von einer Diskontrate von 2 %, einem mittleren Strompreis von 11.5 Rp/kWh über 100 Jahre Betrieb und einer Monetarisierung von Treibhausgasemissionen zu 210 CHF/ t CO₂-eq können die aus Fallbeispielen

gewonnenen Erkenntnisse aus Sicht der Gesamtkosten (inkl. monetarisierter Treibhausgasemissionen) wie folgt zusammengefasst werden:

- Je tiefer die gefahrene Geschwindigkeit, desto eher ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser optimal. Dies ist eine Folge der quadratischen Abhängigkeit der Traktionsenergie von der effektiv gefahrenen Zuggeschwindigkeit. Bei Geschwindigkeiten bis 120 km/h sowie wenn der Anteil der Zugkilometer im höheren Geschwindigkeitsbereich nur klein ist, dürften höhere Innendurchmesser in der Regel nicht gerechtfertigt sein.
- Bei eingleisigen Tunnelröhren ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser eher optimal als bei Doppelspurröhren. Dies liegt daran, dass speziell bei Doppelspurröhren ein erhöhter Innendurchmesser den Vorteil hat, dass aus geometrischen Gründen weniger Beton im Bereich der Sohle erforderlich ist, um auf Höhe der Gleise die für die normkonforme Ausgestaltung der Bankette erforderliche Breite zu erreichen.
- Solange bei Einspurttunnels mit hohen Geschwindigkeiten (160 bis 200 km/h) lediglich der heute gültige Strompreis von 11.5 Rp/kWh zugrunde gelegt wird, ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser in der Regel der optimale.
- Bei Strompreisen über 11.5 Rp/kWh steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein erhöhter Innendurchmesser vorzuziehen ist; dies gilt insbesondere für Doppelspurttunnel.
- Für stark belastete Tunnel im hohen Geschwindigkeitsbereich (d.h. oberhalb von 200 km/h) ist auf jeden Fall eine Einzelfallbetrachtung erforderlich.

Bevor das Modell an verschiedenen Tunneln angewendet und für die Entscheidungsfindung hinsichtlich des optimalen Tunnelquerschnitts herangezogen wird, sollten vom BAV insbesondere folgende Modellparameter überprüft und gegebenenfalls angepasst werden:

- Strompreis: Der festgelegte Wert von 11.5 Rp/kWh, mit dem Stromlieferungen aus bahneigenen Kraftwerken vom schweizerischen Strommarkt entschädigt werden, erscheint aus heutiger Sicht tiefer als der mutmassliche mittlere Strompreis über eine Betriebszeit von rund 100 Jahren. Neben einem höheren Ausgangspreis, der den heutigen Marktbedingungen besser Rechnung trägt, sollte eine lineare Preissteigerung im Umfang von mindestens der Diskontrate eingesetzt werden. Damit wird berücksichtigt, dass der Preis von Strom als zunehmend knappem Gut zukünftig eher ansteigen als konstant bleiben wird.
- Um den Energiesparanstrengungen des Bundes mehr Nachdruck zu verleihen, sollte der Strompreis künstlich um einen definierten Betrag pro kWh erhöht werden, welcher die Zahlungsbereitschaft zur Reduktion des Energieverbrauchs um 1 kWh beschreibt.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	14
1.1	Ausgangslage	14
1.2	Projektauftrag	16
<hr/>		
2.	Projektbeschreibung	17
2.1	Projektziele	17
2.2	Systemabgrenzung	18
2.3	Projektorganisation	25
<hr/>		
3.	Projektstruktur	26
3.1	Gliederung in Projektphasen	26
3.2	Phase 1	26
3.3	Phase 2	27
3.4	Phase 3	28
<hr/>		
4.	Produkt 1: Literaturrecherche	29
4.1	Einflussgrößen in der Bauphase	29
4.1.1	Strukturierung der Bauprozesse im Tunnelbau	29
4.1.2	Kosten Tunnel-Bauverfahren	30
4.1.3	Kosten der Materialbewirtschaftung	31
4.2	Einflussgrößen in der Betriebsphase	34
4.2.1	Einleitung	34
4.2.2	Traktionsenergie für den Zugbetrieb	34
4.3	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen	36
4.3.1	Zahlenwerte für die Energie- und Baumaterialproduktion	36
4.3.2	Monetarisierung der Treibhausgasemissionen	37
4.4	Zusammenfassung Erkenntnisse aus Phase 1	39
<hr/>		
5.	Produkt 2: Optimierungsmodell	40
5.1	Optimierungsgrößen	40
5.2	Ermittlung Rohbaukosten	41
5.3	Ermittlung Energieverbrauch im Bau und zugehörige Treibhausgasemissionen	45
5.4	Ermittlung Traktionsenergie und zugehörige Treibhausgasemissionen	46
5.5	Validierung des Rechenmodells	48

6.	Produkt 3: Excel-Tool für die Anwendung des Optimierungsmodells	49
6.1	Struktur des Excel-Tools	49
6.1.1	Grundsätze	50
6.1.2	Parameter zur Tunnelinfrastruktur und zum Tunnelbau	50
6.1.3	Parameter zum Tunnelbetrieb	51
6.1.4	Übersicht Modellparameter	52

7.	Anwendung des Excel-Tools auf Beispieletunnel	53
7.1	Ergebnisse	53
7.1.1	Brüttenertunnel	54
7.1.2	Ceneri-Basistunnel	57
7.1.3	Eppenbergtunnel	59
7.1.4	Zimmerberg-Basistunnel II	61

8.	Sensitivitätsanalysen und Folgerungen für weitere Tunnel	65
8.1	Vorgehen und Ergebnisse Sensitivitätsanalysen	65
8.1.1	Diskontrate	66
8.1.2	Bahnstrompreis	68
8.1.3	Betriebsdauer Tunnel	69
8.1.4	Baukosten	70
8.2	Verallgemeinerung auf weitere Tunnel	71

9.	Projektwürdigung und Empfehlungen	72
9.1	Erreichter Stand und Projektwürdigung	72
9.2	Empfehlungen zur Anwendung des Modells und Vertiefungen ausserhalb des Projekts GrETu	72
9.3	Mögliche Vertiefungen ausserhalb des Projekts GrETu	73

Anhang

A1	Grundlagen und Literatur	75
A2	Zusammensetzung der beteiligten Gremien	79
A3	Glossar und Abkürzungen	80
	A3.1 Glossar	80
	A3.2 Abkürzungen	82
A4	Bedienungsanleitung Excel-Tool	85
	A4.1 Einleitung	85
	A4.2 Anwendung des Tools zur Bewertung einzelner Tunnel	86
	A4.2.1 Tunneldaten	86
	A4.2.2 Betriebsdaten	87
	A4.3 Anpassung von Modellparametern durch den Tool-Administrator	88
A5	Dokumentation von Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in der Bauphase	90
	A5.1 Einheitskosten	90
	A5.2 Energieverbrauch	93
A6	Berechnung Traktionsenergie	95
	A6.1 Einleitung	95
	A6.2 Laufwiderstand auf offener Strecke	95
	A6.3 Laufwiderstand in einem Tunnel	98
	A6.3.1 Einleitung: Bedeutung des Tunnelfaktors	98
	A6.3.2 Modell zur Berechnung des Tunnelfaktors	98
	A6.4 Berechnung der Traktionsenergie	102
A7	Dokumentation Inputparameter und Resultate untersuchte Tunnel	103
	A7.1 Brüttenertunnel	103
	A7.2 Ceneri-Basistunnel	105
	A7.3 Eppenbergtunnel	107
	A7.4 Zimmerberg-Basistunnel II	109
	A7.4.1 a): Variante 1	109
	A7.4.2 b): Variante 3	111
A8	Liste der zwischen 2000 und 2020 in Betrieb gegangenen Bahntunnel (Normalspurnetz)	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tunnel-Querprofil	10
Abbildung 2: Veranschaulichung der Optimierung mittels fiktiver Werte.	18
Abbildung 3: Illustration, dass ein vom Tunneldurchmesser unabhängiger, additiver Beitrag zur Optimierungsgrösse das zugehörige Optimum nicht beeinflusst	19
Abbildung 4: Strukturierung der Prozesse im Tunnelbau	29
Abbildung 5: Ergebnis der Ökobilanz für die Materialbewirtschaftung beim Gotthard-Basistunnel	31
Abbildung 6: Relative Beiträge der drei bremsenden Kräfte zur Traktionsenergie, um eine konstante Geschwindigkeit bei Tunnelfahrt aufrechtzuerhalten	36
Abbildung 7: Vorgehen zur Minimierung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen	40
Abbildung 8: Vorgehen zur Minimierung der Gesamtkosten in CHF bezogen auf das Inbetriebnahmejahr des zu beurteilenden Tunnels	41
Abbildung 9: Schema Aufbau Tunnel, Einbauten und massgebliche geometrische Grössen	42
Abbildung 10: Mindestabstand zwischen Fahrbahnplatte und Innenverkleidung	43
Abbildung 11: Brüttenertunnel – Gesamtkosten	55
Abbildung 12: Brüttenertunnel – Treibhausgasemissionen	56
Abbildung 13: Brüttenertunnel – Energieverbrauch	56
Abbildung 14: Ceneri-Basistunnel – Gesamtkosten	58
Abbildung 15: Ceneri-Basistunnel – Treibhausgasemissionen	58
Abbildung 16: Ceneri-Basistunnel – Energieverbrauch	58
Abbildung 17: Eppenbergtunnel – Gesamtkosten	60
Abbildung 18: Eppenbergtunnel – Treibhausgasemissionen	60
Abbildung 19: Eppenbergtunnel – Energieverbrauch	60
Abbildung 20: ZBT II: Variante 1 – Gesamtkosten	62
Abbildung 21: ZBT II: Variante 1 – Treibhausgasemissionen	62
Abbildung 22: ZBT II: Variante 1 – Energieverbrauch	62
Abbildung 23: ZBT II: Variante 3 – Gesamtkosten	63

Abbildung 24: ZBT II: Variante 3 – Treibhausgasemissionen	64
Abbildung 25: ZBT II: Variante 3 – Energieverbrauch	64
Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Diskontrate/Abzinsungsfaktor und dem zeitgewichteten Diskontierungsfaktor.	67
Abbildung 27: Einfluss des jährlichen Abzinsungsfaktors auf die Gesamtkosten	68
Abbildung 28: Sensitivitätsanalyse vom Bahnstrompreis – Gesamtkosten	68
Abbildung 29: Sensitivitätsanalyse der Betriebsjahre – Gesamtkosten	69
Abbildung 30: Sensitivitätsanalyse der Betriebsjahre – Energieverbrauch	70
Abbildung 31: Sensitivitätskosten der Baukosten – Gesamtkosten	70
Abbildung 32: Darstellung der verschiedenen Legenden bei der Dateneingabe	85
Abbildung 33: Darstellung der verschiedenen Eingabefelder	85
Abbildung 34: Beispiel für die Eingabe der Tunneldaten (1/2)	86
Abbildung 35: Beispiel für die Eingabe der Tunneldaten (2/2)	87
Abbildung 36: Eingabewerte für die im Tunnel verkehrende Zugtypen	88
Abbildung 37: Eingabewerte für das Geschwindigkeitsprofil	88
Abbildung 38: Einfluss der freien Tunnelquerschnittsfläche F_{ae} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	99
Abbildung 39: Einfluss der Zugquerschnittsfläche A_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	100
Abbildung 40: Einfluss der Zuglänge L_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	100
Abbildung 41: Einfluss der Tunnellänge L_{tu} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	100
Abbildung 42: Einfluss des Zugreibungskoeffizienten λ_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	101
Abbildung 43: Einfluss des Kopfverlustkoeffizienten α_K auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	101
Abbildung 44: Einfluss des Tunnelreibungskoeffizienten λ_{tu} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T	101
Abbildung 45: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit v_Z auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Aspekte beim Optimierungsmodell	24
Tabelle 2:	Bauverfahren im Tunnelbau	30
Tabelle 3:	Energieverbrauch sowie Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus der wichtigsten im Tunnelbau eingesetzten Stoffe und Materialien gemäss Ecoinvent v 3.6.	37
Tabelle 4:	Ansätze zur Monetarisierung von Treibhausgasemissionen.	38
Tabelle 5:	Abhängigkeiten der einzelnen Bauprozessen	44
Tabelle 6:	Auszug aus TBM Bauprozess für Kosten- und Materialberechnung	45
Tabelle 7:	Im Rahmen des Optimierungsmodells betrachtete Zugkompositionen, für die die Traktionsenergie ermittelt wird	47
Tabelle 8:	Wichtigste Kenngrössen Brüttenertunnel	54
Tabelle 9:	Brüttenertunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}	54
Tabelle 10:	Wichtigste Kenngrössen Ceneri-Basistunnel	57
Tabelle 11:	Ceneri-Basistunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}	57
Tabelle 12:	Wichtigste Kenngrössen Eppenbertunnel	59
Tabelle 13:	Eppenbertunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}	59
Tabelle 14:	Wichtigste allgemeine Kenngrössen ZBT II	61
Tabelle 15:	Varianten des ZBT II (Tunnelläge, zulässige Höchstgeschwindigkeit für Reisezüge und geplanter Innendurchmesser)	61
Tabelle 16:	ZBT II: Variante 1 – Innendurchmesser und h_{SOK}	61
Tabelle 17:	ZBT II: Variante 3 – Innendurchmesser und h_{SOK}	63
Tabelle 18:	Gremien, vertretene Institutionen und Mitglieder	79
Tabelle 19:	Zugtypen	88
Tabelle 20:	Einheitskosten und Annahmen für den MUF-Vortrieb	90
Tabelle 21:	Einheitskosten und Annahmen für den MUL-Vortrieb	90
Tabelle 22:	Einheitskosten und Annahmen für den SM-Vortrieb	91
Tabelle 23:	Einheitskosten und Annahmen für den SPV-Vortrieb	91
Tabelle 24:	Einheitskosten und Annahmen für den TBM-Vortrieb	92
Tabelle 25:	Einheitskosten und Annahmen für alle Vortriebsmethoden	93
Tabelle 26:	Energieverbrauch der Bauprozesse	94

Tabelle 27:	Basiswerte für Treibhausgasemissionen	94
Tabelle 28:	Zuggewichte, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwerte für die untersuchten Reisezugkompositionen	97
Tabelle 29:	Zuggewichte, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwerte für die untersuchten Güterzugkompositionen	97
Tabelle 30:	Aerodynamisch relevante Parameter der betrachteten Züge	99
Tabelle 31:	Aerodynamisch relevante Parameter der betrachteten Tunnel	99
Tabelle 32:	Normalspurtunnel	113

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Um der erwarteten, steigenden Nachfrage im Bahnverkehr in der Schweiz zu entsprechen, sind verschiedene Neubaustecken in Planung. Um die angestrebten Fahrzeiten bzw. die hierfür erforderlichen Geschwindigkeiten im Reisezugverkehr zu erreichen, wird eine möglichst gradlinige Linienführung mit geringen Steigungen angestrebt. Aufgrund der Topografie der Schweiz bzw. der dichten Besiedlung des Mittellands sind hierfür oftmals Tunnelbauwerke notwendig, obwohl diese die Erstellungskosten von Neubaustrecken deutlich in die Höhe treiben. Der Einfluss von Tunneln auf den Energieverbrauch ist komplex:

- Der Bau von Tunneln ist energieintensiver als der Bau einer gleich langen offenen Strecke. Gleiches gilt bei gleicher Streckenlänge und Steigung für den Betrieb, da aus aerodynamischen Gründen der Luftwiderstand in Tunneln höher ist als auf offener Strecke.¹
- Dank kürzeren Fahrdistanzen und geringeren Steigungen reduziert sich die Traktionsenergie (besonders ausgeprägt gilt dies für die langen Alpentunnel).

Neben der Linienführung, welche die Länge und Tiefenlage des Tunnels bestimmt, sowie der Wahl des Tunnelsystems (insbesondere Doppelspur- bzw. zwei Einspurröhren) ist die Wahl des Tunneldurchmessers ein wichtiger Planungsentscheid, der unter anderem die Baukosten und den Energiebedarf für den Bau massgeblich beeinflusst. In der SIA-Norm 197/1 «Projektierung Tunnel – Bahntunnel» [1] bzw. dem zugehörigen Merkblatt 779-11 der «Union Internationale des Chemins de fer (UIC)» [2] gibt es Vorgaben hinsichtlich der minimalen freien Tunnelquerschnittsfläche. Letztere hängt primär von der Höchstgeschwindigkeit sowie der Querschnittsfläche der darin verkehrenden Züge ab. Damit wird gewährleistet, dass die im ungünstigsten Fall auftretenden Druckspitzen² keine gesundheitlichen Schäden zeigen und den Komfort der Reisenden nicht über Gebühr beeinträchtigen.

Eisenbahntunnel werden heutzutage mit einem grösseren Querschnitt geplant als in den 90er Jahren, als der Querschnitt für die drei AlpTransit-Tunnel festgelegt wurden. Mit dazu beigetragen hat die Erkenntnis, dass die Minimierung des Tunneldurchmessers im Betrieb Nachteile mit sich bringt. So hat die SBB beim Gotthard-Basistunnel (GBT) festgestellt, dass die

1 In Gebieten mit signifikanten Höhenunterschieden erlauben Tunnel zudem eine effizientere Produktion im Güterverkehr, da der Betrieb einer Flachbahn weniger Lokomotiven erfordert (kein Vorspann oder Schiebelok notwendig, um Güterzüge mit den gewünschten Gewichten zu führen).

2 Der ungünstigste Fall bei einem Doppelspurtunnel ergibt sich in der Regel beim Kreuzen zweier nicht druckertüchtiger, mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit verkehrenden Doppelstock-Reisezüge an der Stelle, wo sich die Druckwellen maximal überlagern.

Stromabnehmer bereits bei Geschwindigkeiten von 200 km/h³ infolge von aerodynamischen Einwirkungen Schwingungen unterworfen sind, welche die Abnützung der Fahrleitung bzw. des Pantographen stark erhöhen sowie häufiger zur Bildung von Lichtbogen führen, welche auch zu Defekten Anlass geben können.⁴

Da der Luftwiderstand bei der Fahrt in einem Tunnel mit abnehmendem Tunneldurchmesser (bzw. der zugehörigen freien Querschnittsfläche) stark zunimmt, stellt sich für die Wahl des optimalen Tunneldurchmessers ein Optimierungsproblem:

- Mit steigendem Tunneldurchmesser nehmen die Baukosten sowie der Energieverbrauch für den Bau zu. Beim Energieverbrauch ist auch zu berücksichtigen, dass im Tunnelbau grosse Mengen von Materialien sowie Maschinen eingesetzt werden (insbesondere Beton und Stahl), deren Erzeugung bzw. Konstruktion aus Rohstoffen grosse Energiemengen erfordert (sogenannte «graue Energie»⁵).
- Mit steigendem Tunneldurchmesser nehmen die für den Bahnbetrieb erforderliche Traktionsenergie und somit auch die Betriebskosten signifikant ab. Da der Luftwiderstand und damit die aufzubringende Traktionsleistung zur Beibehaltung der angestrebten Geschwindigkeit mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmen, gilt dies insbesondere für Tunnel mit einer hohen Betriebsgeschwindigkeit. Da der Rohbau eines Tunnels gemäss den Vorgaben in [1] ohne Erneuerungsarbeiten auf eine Lebensdauer von 80 bis 100 Jahre auszulegen ist, kann durch die Erhöhung des Tunneldurchmessers somit über Jahrzehnte Traktionsenergie gespart werden.

Mit dem Energiegesetz, den zugehörigen Regelwerken sowie zahlreiche Aktivitäten unter dem Label «Energiestrategie 2050» bezweckt der Bund, den Energieverbrauch bei Gebäuden, im Verkehr und bei Elektrogeräten zu senken und die Energieeffizienz zu erhöhen.⁶ Zudem sollen einheimische erneuerbare Energien gestärkt und der Verbrauch von fossilen Energieträgern reduziert werden. Die Energiestrategie 2050 stellt auch ein wichtiger Pfeiler in der Klimaschutzstrategie auf allen Ebenen (Bund, Kantone, Gemeinden) dar. Für die Stellen, die beim Bund für die Planung von Bahntunneln verantwortlich sind, stellt sich die Frage, wie dabei dem Klimaschutz sowie den Zielen der Energiestrategie 2050 Rechnung getragen werden soll.

3 Der GBT ist auf Geschwindigkeiten bis 250 km/h ausgelegt und wurde mit einem aus heutiger Sicht eher knappen Tunneldurchmesser erstellt. Derzeit bzw. aus fahrplantechnischen Gründen (schnelle Reisezüge im Stunden- bzw. Halbstundentakt gefolgt von Gütertrassen mit 80 - 100 km/h) gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h, wobei einzelne Zugtypen für das Aufholen von Verspätungen mit bis zu 230 km/h verkehren dürfen. Die (theoretische) Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h kann aufgrund der aerodynamischen Randbedingungen bzw. der zu geringen installierten Leistung der Fahrmotoren von den meisten Reisezügen über längere Abschnitte des GBT nicht erreicht werden, auch wenn diese Züge auf 250 km/h ausgelegt sind und diese Geschwindigkeit im Freien erreichen.

4 Je nach Tunnelquerschnitt müssten Stromabnehmer in Tunneln auf Geschwindigkeiten ausgelegt sein, die um ca. 30% höher liegen als die normale Auslegungsgeschwindigkeit, was heute meist nicht der Fall ist.

5 Die wichtigsten Fachbegriffe sowie Abkürzungen sind in Anhang A2 definiert.

6 Vgl. folgenden Link: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html>

Dem Bundesamt für Verkehr, als für die Planung von Bahntunneln federführender Behörde, fehlen derzeit belastbare Grundlagen, um eine aus Sicht Energieverbrauch, Kosten und Treibhausgasemissionen langfristig optimale Wahl des Querschnitts von Bahntunneln zu gewährleisten. Wissenschaftlich fundierte Untersuchungen, unter welchen Bedingungen ein vergrößerter Tunneldurchmesser die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Tunnelbauwerken über deren gesamten Lebenszyklus erhöhen kann, sind keine bekannt.⁷

Belastbares Wissen zur Optimierung des Querschnitts von Bahntunneln hilft auch bei der Konsensfindung zwischen Stakeholdern, die unterschiedliche Sichtweisen vertreten. Vertreter von Infrastrukturbetreiberinnen möchten die Betriebskosten minimieren, was für grössere Tunneldurchmesser spricht. Die für die Finanzierung von Tunnelneubauten zuständigen Stellen dürften in der Regel eher die gegenteilige Position vertreten.

1.2 Projektauftrag

Vor diesem Hintergrund hat das BAV beschlossen, das Projekt «Graue Energie Bahntunnel» (Abkürzung: GrETu) zu lancieren. Im Rahmen dieses Projekts ist ein Modell zu erarbeiten, welches belastbare Grundlagen liefert zur Festlegung des optimalen Tunnelquerschnitts hinsichtlich Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Dank des Modells sollen die Phasen Bau und Betrieb energetisch, wirtschaftlich und aus Sicht Klimaschutz optimal aufeinander abgestimmt werden können. Zudem ist ein Excel-Tool zu erstellen, welches eine einfache Anwendung des Modells an konkreten Tunnelinfrastrukturen erlaubt. Mit dem obigen Projektnamen soll betont werden, dass die graue Energie von Baumaterialien und die mit dem gesamten Energieverbrauch verbunden (Klima-) Auswirkungen angemessen zu berücksichtigen sind.

⁷ Langjährige Bahnexperten bei DB Systemtechnik bestätigen, dass ihnen keine wissenschaftlich fundierte Studie zur Optimierung des Tunnelquerschnitts aus Sicht des Energieverbrauchs sowie der Kosten (mit bzw. ohne Einbezug der Treibhausgasemissionen) bekannt ist, obwohl sich diese Fragestellung bei jeder Tunnelplanung, zumindest bei hohen Betriebsgeschwindigkeiten, stellt.

2. Projektbeschreibung

2.1 Projektziele

Das übergeordnete Ziel des Projekts «GrETu» ist es, ein Modell zu entwickeln, mit dem der Tunneldurchmesser D ⁸ bzw. der freie Tunnelquerschnitt F_{ae} aus drei Perspektiven über den gesamten Life-Cycle hinweg optimiert werden kann:

1. Energiebilanz (Energiebedarf für den Bau des Tunnels sowie für dessen Betrieb).
2. Emission von Treibhausgasen aus dem Bau und Betrieb.
3. Gesamtkosten bzw. Wirtschaftlichkeit (Kosten für Erstellung und Betrieb inkl. Energiekosten und Kosten der Treibhausgasemissionen).

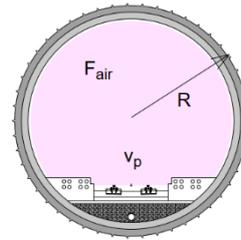


Abbildung 1:
Tunnel-Querprofil

Die Optimierung soll nachvollziehbar und wissenschaftlich fundiert erfolgen. Bewertungen, welche subjektive Aspekte beinhalten, wie z.B. die Berücksichtigung schädlicher Treibhausgasemissionen oder die Zahlungsbereitschaft, diese zu mindern, sollen transparent dargestellt werden; die zugehörigen Annahmen sollen möglichst konsensfähig sein und den beteiligten Stakeholdern zur Stellungnahme unterbreitet werden.

Bei der Optimierung sind alle Energieverbräuche, Kosten und Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen, die vom gewählten Tunneldurchmesser abhängen.⁹

Unter der Voraussetzung, dass die berücksichtigten Treibhausgasemissionen monetarisiert werden und zu den Bau- sowie Betriebskosten hinzuzugerechnet werden, kann das Ergebnis der Optimierung gemäss Abbildung 2 dargestellt werden. Mathematisch gesprochen ist die Existenz und Lage eines lokalen Minimums bei der Summe aller Kostenpositionen (inkl. Kosten von Treibhausgasemissionen) in Abhängigkeit des Tunneldurchmessers (bzw. des zugehörigen Werts für F_{ae}) zu ermitteln. Fehlt ein solches Kostenminimum (vgl. grüne Kurve in Abbildung 2), so stellt der minimale Tunneldurchmesser gemäss Norm (linkes Ende der Kurve) die Bestvariante dar.

8 Es wird der häufigste Fall einer kreisförmigen Tunnelröhre betrachtet, vgl. auch Kapitel 2.2.

9 In Kapitel 1.5 wird dargestellt, welche Kosten im Rahmen des Projekts GrETu berücksichtigt werden und welche aus Gründen der Komplexität ausgeklammert und ggf. zu einem späteren Zeitpunkt einbezogen werden.

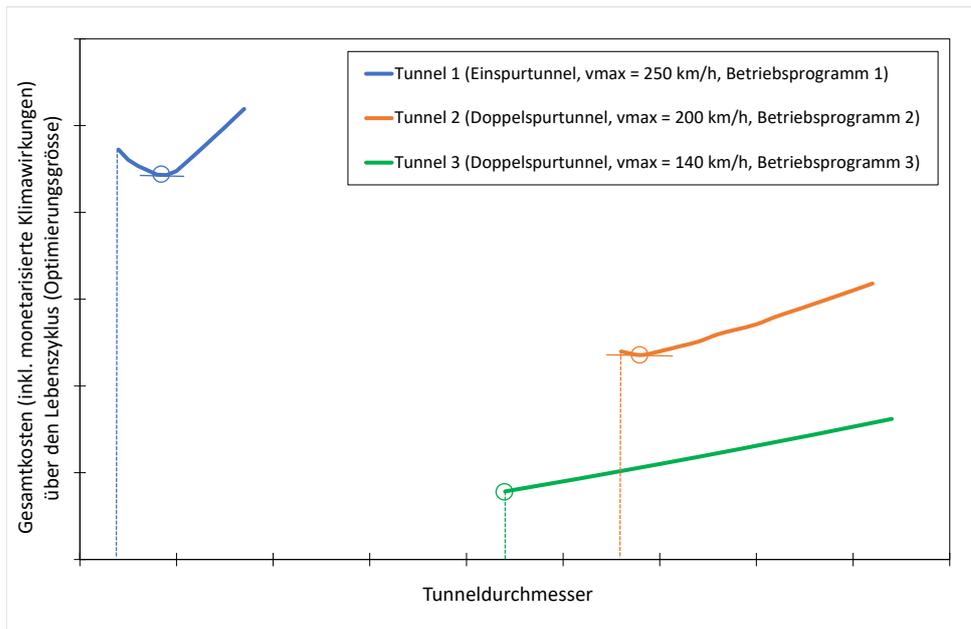


Abbildung 2: Veranschaulichung der Optimierung mittels fiktiver Werte. Das linke Ende einer Kurve markiert den Mindestwert des Tunnelquerschnitts gemäss geltenden Normen (gestrichelte Linie). Bei der blauen und orangenen Kurve existiert ein Kostenminimum, d.h. das Optimum liegt über dem Mindestdurchmesser. Bei der grünen Kurve ist dies nicht der Fall.

Die Ermittlung des optimalen Tunneldurchmessers soll in einem einfachen IT-Tool (z.B. in Excel) so implementiert werden, dass es vom BAV bzw. von Planern und Fachexperten angewendet werden kann. Im Tool sollen alle relevanten Infrastruktur- und betrieblichen Merkmale eines zu beurteilenden Bahntunnels abgebildet sein; diese können durch den Anwender tunnelspezifisch angepasst werden. Zudem sollen die notwendigen Modellparameter hinsichtlich Bau- und Betriebskosten sowie Treibhausgasemissionen hinterlegt sein; diese sollen im Sinne der Einheitlichkeit der Anwendung nur in begründeten Fällen von einem Administrator beim BAV angepasst werden können (Schreibschutz). Die Anwendung an einem Tunnel soll bereits in einer frühen Planungsphase möglich sein, sofern die erforderlichen Parameter bekannt sind oder zumindest einschätzbar sind.

2.2 Systemabgrenzung

Für die Entwicklung des Optimierungsmodells ist es wichtig, eine genaue, umfassende Systemabgrenzung vorzunehmen. Dies betrifft unterschiedlichste Aspekte wie die betrachteten Optimierungsgrößen, Phasen im Lebenszyklus eines Tunnels oder Umweltauswirkungen. Tabelle 1 zeigt die Systemabgrenzung in Bezug auf unterschiedlichste Aspekte.

Additive Beiträge zu den drei Optimierungsgrößen (Gesamtenergieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten), die nicht oder nur wenig vom Tunneldurchmesser abhängen, haben keinen signifikanten Einfluss

auf den optimalen Tunneldurchmesser (vgl. Abbildung 3).¹⁰ Folgende Einflussgrößen bzw. Aspekte können deshalb in guter Näherung vernachlässigt werden:

- Baustelleninstallation
- Kurven in Tunneln sowie Steigungen bzw. Gefälle (d.h. die Traktionsenergie kann für eine gerade, ebene Strecke ermittelt werden),
- Entwässerungsleitungen mit Pumpen
- Querschläge zwischen zwei parallelen, richtungsgetrenten Röhren,
- Ausbauten nach Erstellen Rohbau (z.B. Einbau Bahntechnik mit Fahrbahn, Gleisen, Signalen, Fahrleitung etc., Beleuchtung).

Im Sinne einer Vereinfachung werden all diese Aspekte bei den Optimierungsgrößen nicht betrachtet. Der Begriff «Rohbau» wird im Sinne dieser Vereinfachung verstanden, d.h. im Rahmen des Projekts GrETu enthält der Rohbau nur «Elemente», die vom Tunneldurchmesser abhängig sind. Für das Projekt GrETu ausgewiesene Kenngrößen wie Rohbaukosten müssen deshalb mit Vorsicht mit Kenngrößen von ausserhalb des Projekts GrETu vergleichen und unter Berücksichtigung dieser Abgrenzung interpretiert werden.

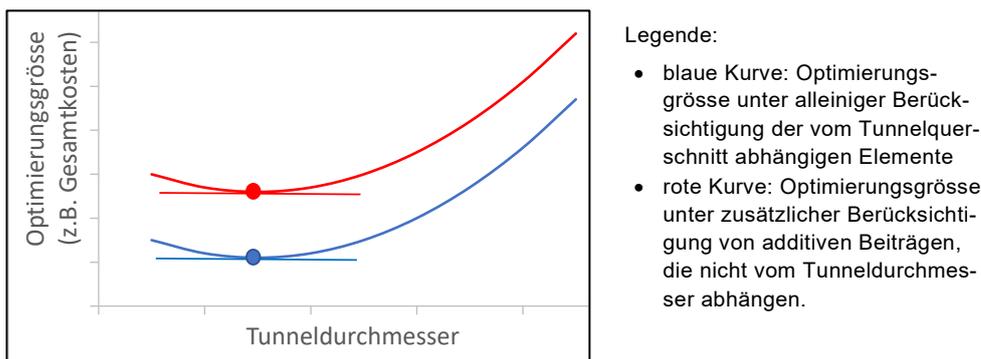


Abbildung 3: Illustration, dass ein vom Tunneldurchmesser unabhängiger, additiver Beitrag zur Optimierungsgröße das zugehörige Optimum nicht beeinflusst (Parallelverschiebung Kurven hat keinen Einfluss auf Existenz und Lage eines Minimums).

¹⁰ Dies gilt jedoch nicht für multiplikative Einflüsse (z.B. Wirkungsgrad Triebzüge oder Lokomotiven auf die Traktionsenergie).

Aspekt	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	Bemerkungen
Spurweite in Tunnelstrecken	Normalspur	Schmalspur	Geschwindigkeit von Schmalspurbahnen ist zu gering, als dass aus einem grösserem Tunneldurchmesser eine hinreichende Minderung der Traktionsenergie resultiert. Erhöhung Tunneldurchmessers gegenüber den Vorgaben in den Normen steht deshalb nicht zur Diskussion und wäre a priori unwirtschaftlich.
Schienenoberbau	feste Fahrbahnplatte	Schotteroberbau	Die geometrischen Abmessungen sowie die eingesetzten Baumaterialien basieren auf dem für neue Tunnel üblichen Fall einer festen Fahrbahn.
Ausbruchquerschnitt bzw. -profil	kreisförmig	Rechteck- und andere Profile	Die zur Ermittlung des Tunnelfaktors notwendigen aerodynamischen Modelle basieren auf kreisförmigen Tunnelquerschnitten, die weitaus am häufigsten sind (u.a. als Voraussetzung für Einsatz TBM). Grobe Aussagen für andere Profile (z.B. für CBT) lassen sich dennoch machen.
Untersuchungszeitraum	Bau- und Betriebsphase	Planung Bau, Rückbau	<p>Der Untersuchungszeitraum beinhaltet die Bau- sowie die Betriebsphase. Bei der Ausserbetriebsetzung wird angenommen, dass neben dem «administrativen Akt» lediglich die Portale verschlossen werden. Das Auffüllen eines Tunnels stellt aus heutiger Sicht eine Ausnahme dar, die nur dann praktiziert wird, wenn dies aus Gründen der Sicherheit notwendig ist (z.B. fehlende Stabilität des Gewölbes bei darüberstehenden Bauwerken). Arbeiten im Zusammenhang mit der Ausserbetriebsetzung sind aus Sicht der Kosten, des Energieverbrauchs sowie der Emission von Treibhausgasen irrelevant.</p> <p>Auch wenn die Planungskosten typischerweise 15 % der Baukosten ausmachen, so unterscheiden sich die Planungskosten für zwei Tunnelvarianten am gleichen Ort mit unterschiedlichen Baukosten infolge unterschiedlicher Tunnelquerschnitte nicht signifikant. Die 15 % stellen in diesem Sinne lediglich einen groben Mittelwert dar. Je grösser der Tunneldurchmesser, desto kleiner müsste in der Regel der Anteil der Planungs- an den gesamten Baukosten sein.</p>

Aspekt	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	Bemerkungen
Abgrenzung Betriebsphase	Zugfahrten	Tunnelunterhalt	Annahme: Kosten und Energiebedarf für Unterhaltsarbeiten werden als weitgehend unabhängig vom Tunneldurchmesser angenommen und werden deshalb nicht betrachtet. Dabei wird auch davon ausgegangen, dass beide im Vergleich zu Traktion eine untergeordnete Bedeutung haben. Damit wird aber auf folgende Argumentation nicht eingegangen: Bei breiteren Banketten, die den Einsatz von Spezialfahrzeugen für Transporte von Personal und Material erlauben, lassen sich unter Umständen die Unterhaltskosten (inkl. der indirekten Kosten von Tunnelsperrungen) so stark mindern, dass entsprechende Mehrkosten für einen grösseren Tunnelquerschnitt gerechtfertigt sind.
Betriebsdauer Tunnel	Lebensdauer Rohbau	Verlängerung dank Rohbauerneuerung	Mögliche Verlängerung der Betriebsdauer über 80 - 100 Jahre hinaus erfordert unter Umständen eine Rohbauerneuerung (z.B. Ausbohren sämtlicher Betoneinbauten). Ein Betrieb über die Lebensdauer des Rohbaus hinaus wird nicht betrachtet. Konsequenterweise werden auch Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen einer Rohbauerneuerung nicht berücksichtigt.
Graue Energie	Baumaterialien	Maschinenpark (z.B. TBM) und Transportfahrzeuge bzw. -infrastruktur	Analyse zeigt, dass graue Energie von Baumaterialien deutlich grösser ist, als der Teil der grauen Energie, der in die Produktion von Maschinen, Fahrzeugen etc. eingeht. Der wichtigste Grund dafür liegt darin, dass Maschinen und Fahrzeug als Ganzes auf anderen Baustellen weiterverwendet oder zumindest wichtige Materialien wie Metalle recycelt werden können.

Aspekt	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	Bemerkungen
Umweltwirkungen bei Produktion Baustoffe	Klimawirkungen über Treibhausgasemissionen	Alle anderen Umweltwirkungen (z.B. Luftschadstoffe)	<p>Die Methodik der Umweltbelastungspunkte (UBP) gibt einen Überblick über die verschiedenen Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit der Produktion von Baustoffen, die im Tunnelbau Verwendung finden. Im Vergleich dazu sind die «direkten» Umweltauswirkungen (d.h. solche am Ort der Baustelle) beim Rohbau eher gering. Der Betrieb von Tunneln ist wenig relevant, da die Umweltauswirkungen von nachhaltig erzeugtem Strom (primär aus Wasserkraft), vergleichsweise gering sind. Es sprengt den Rahmen des Projekts GrETu, all diese Umweltauswirkungen im Rahmen des Optimierungsmodells zu berücksichtigen. Der begrenzte Stellenwert der Treibhausgasemissionen legt den Schluss nahe, dass die Ergebnisse von GrETu nicht grundsätzlich ändern würden, wenn neben den Treibhausgasemissionen auch andere Umweltauswirkungen quantitativ berücksichtigt würden.</p>
Nachteile kleiner Tunnelquerschnitte	erhöhte Traktionsenergie	Lärm, negative Auswirkungen von Luftströmungen (z.B. auf Fahrleitung sowie deren Interaktion mit dem Pantograph), Druckkomfort für Reisende und Druckdichtigkeit von Reisezügen	<p>Unterschiede im Tunnelquerschnitt werden lediglich in Bezug auf folgende Aspekte bewertet bzw. modelliert: Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen beim Bau und Betrieb. Nicht quantitativ analysiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Einwirkungen auf das Rollmaterial sowie auf feste Elemente der Tunnelinfrastruktur (z.B. Verschleiss an den Pantographen, Zugstüren oder -fenstern, an Türen bei Querschlägen oder an der Fahrleitung infolge ungünstiger Luftströmungen). — Einwirkungen auf Reisende in Zügen (z.B. Lärm, Druckstösse, Druckkomfort) <p>Der Mindestdurchmesser für die Erfüllung der geltenden Normen und Anforderungen (insbesondere Komfortkriterium für Reisende) ist kein Ergebnis des zu erarbeitenden Modells und ist durch den Anwender ausserhalb des Modells (Untergrenze für Variation Durchmesser).</p>

Aspekt	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	Bemerkungen
Traktionsenergie	einzelne Zugfahrten ohne gegenseitige Beeinflussungen, d.h. Tunnelleinfahrt bei stehender Luftsäule	Gegenseitige Einflüsse verschiedener Zugfahrten (Fahrplan), Kreuzungen, Überholungen	Annahme: Tunnelleinfahrt erfolgt bei stehender Luftsäule im Tunnel. Berücksichtigung von aerodynamischen Abhängigkeiten zwischen mehreren gleichzeitigen oder kurz aufeinander folgenden Zugfahrten ist zu komplex, als dass diese im Rechenmodell berücksichtigt werden kann. Tendenziell wird die Traktionsenergie bei DS-Tunnel unterschätzt (Fahrten mit Zugkreuzungen), bei ES-Tunnel überschätzt (Luft im Tunnel bewegt sich permanent in Fahrtrichtung). Dies gilt in umso stärkeren Masse, je länger der Tunnel ist.
Traktionsenergie	Fahrt in Ebene	Steigungs- und Gefällestrecken	Da in der Praxis in beiden Richtungen gefahren wird und über 90 % der Bremsenergie rekuperiert werden kann, sind gravitative Einflüsse vernachlässigbar. Zudem korrelieren grosse Geschwindigkeiten mit kleinen Steigungen, so dass Modell bei grossen Geschwindigkeiten (= für Optimierung interessantester Fall) wenig vom Streckenprofil abhängt.
Traktionsenergie	Fahrt geradeaus	Kurvenfahrt	Bei Kurvenfahrt ist Traktionsenergie geringfügig grösser, was jedoch in guter Näherung vernachlässigbar ist.
minimal zulässiger Tunnelquerschnitt + Nachweis Einhaltung Gesundheits- und Komfortkriterium	nur indirekt über Eingabewerte des Anwenders	Nachweis der Einhaltung von Gesundheits- und Komfortkriterien	Die Modellanwendung setzt voraus, dass der Mindestquerschnitt bekannt ist (und als Tunnelparameter eingegeben wird), damit geltende Gesundheits- und Komfortkriterien eingehalten sind. Im Rahmen des Modells wird lediglich geprüft, dass die Bankette genügend breit sind (Anforderungen Selbstrettung zu Fuss) und der notwendige Platz für Leitungen zwischen den Bereichen unterhalb der Bankette und der Sohle vorhanden ist.
Abhängigkeit Geschwindigkeitsprofil von Tunneldurchmesser	Reduktion Traktionsenergie bei grösserem Tunneldurchmesser	Geschwindigkeitserhöhung als Kompensation und volkswirtschaftliche Folgen kürzerer Reisezeiten	Neben dem Tunnelsystem (z.B. Systementscheid) sind die betrieblichen Randbedingungen (zulässige Höchstgeschwindigkeit, Anzahl Zugfahrten) zu klären; alle zugehörigen Grössen sind Inputparameter für die Anwendung des Modells und sind nicht Teil der Optimierung. Dies bedeutet z.B., dass die Fahrzeit nicht monetarisiert wird, sondern als fixe Randbedingung betrachtet wird.

Aspekt	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	Bemerkungen
Optimierungsgrösse	Innendurchmesser bzw. freie Querschnittsfläche F_{ae}	Rauigkeit Tunnelwand und Druckausgleichsschächte zwischen 2 Röhren bzw. zwischen einer Röhre und der Umgebung.	Die Innenschale eines modernen Tunnels weist a priori eine geringe Rauigkeit auf; sodass der Einfluss auf die Traktionsenergie vernachlässigbar ist. Unterschiede sind in der Praxis deshalb nicht von Interesse. Der Nutzen von Druckausgleichsschächten wird sehr kontrovers beurteilt. Anforderungen des Brandschutzes (Rauchausbreitung zwischen benachbarten Röhren) bzw. die Höhe der Überdeckung erschweren die Anwendung in der Praxis signifikant. Angesichts der Komplexität, insbes. aus Sicht der Aerodynamik, erfolgt keine quantitative Bearbeitung im Rahmen des vorliegenden Projekts.
Rollmaterial	aerodynamische Eigenschaften	Druckdichtigkeit, Einfluss auf medizinische bzw. Komfortanforderungen. ¹¹	Die Optimierung beschränkt sich auf den Tunneldurchmesser. Das eingesetzte Rollmaterial sowie seine Eigenschaften (Druckdichtigkeit, Luftwiderstand etc.) wird als gegeben vorausgesetzt und ist nicht Teil der Optimierung. Die minimal zulässige freie Querschnittsfläche F_{ae} hängt unter anderem vom eingesetzten Rollmaterial für den Reisezugverkehr ab (Einhaltung von Gesundheits- und Komfortkriterien für Reisende in Zügen).
Wirtschaftlichkeit	Kosten	indirekte wirtschaftliche Auswirkungen.	Beispiel: Beschäftigungseffekte höherer Baukosten oder andere volkswirtschaftliche Auswirkungen von grösseren Tunnelquerschnitten werden nicht berücksichtigt (bzw. monetarisiert).

Tabelle 1: Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Aspekte beim Optimierungsmodell

¹¹ Diese Aspekte haben insofern einen Einfluss, als sie den gemäss geltenden Normen minimal zulässigen Tunnelquerschnitt mitbestimmen. Auf die «nicht-triviale» Optimierung, d.h. auf die Lage eines lokalen Minimums, wenn ein solches existiert, haben diese Aspekte jedoch keinen Einfluss.

2.3 Projektorganisation

Für die fachliche Unterstützung im Projekt «GrETu» hat das BAV die Firma EBP Schweiz AG beigezogen, welche wiederum DB Systemtechnik AG, eine Tochterfirma der Deutschen Bahn, für Fragen der Aerodynamik und Traktionsenergieberechnung als Unterauftragnehmerin hinzuzog.

Zur Steuerung und Begleitung des Projekts «GrETu» sowie zur Qualitätssicherung wurden drei unterschiedliche Gremien eingesetzt:

- Fachausschuss: Dieser ist für eine enge fachliche Begleitung zuständig, macht inhaltliche Inputs und kontrolliert, dass die Bearbeitung sowie die erarbeiteten Produkte fachlich korrekt sind.
- Projektausschuss: Dieser ist für die Steuerung des Projekts zuständig und gibt die einzelnen Projektphasen frei. Zudem genehmigt er die erarbeiteten Produkte. Schliesslich ist der Projektausschuss auch zuständig, die Grundhaltung des BAV in Bezug auf die Optimierung des Tunneldurchmessers festzulegen und ins Projekt einzubringen.
- Begleitgruppe: Die Begleitgruppe vertritt die Interessen BAV-externer Stakeholder. Sie können Vorschläge zum Projekt einbringen sowie zu den erarbeiteten Produkten Stellung nehmen.

Die in den Gremien vertretenen Personen und Institutionen sind im Anhang A2 aufgelistet.

3. Projektstruktur

3.1 Gliederung in Projektphasen

Um die in Kapitel 2 aufgeführten Ziele zu erreichen, wird das Projekt GrETu in drei Phasen gegliedert, deren Arbeiten stichwortartig wie folgt umschrieben werden können:

- Phase 1: – Literaturrecherche und -auswertung;
 - Identifikation der massgeblichen Grössen für die Optimierung nach Gesamtenergieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten;
 - Identifikation des Vertiefungsbedarfs in Phase 2;
 - Dokumentation der Arbeiten in einem 1. Zwischenbericht [55] und Einholen von Stellungnahmen durch die Begleitgruppe.
- Phase 2: – Erarbeitung des Modells zur Optimierung des Tunneldurchmessers aus Sicht der drei oben aufgeführten Grössen (inkl. notwendige Zusatzrecherchen);
 - Entwicklung eines einfachen Excel-Tools für die Anwendung der Methodik an Tunneln;
 - Anwendung des Excel-Tool an ausgewählten Tunneln;
 - Dokumentation der Arbeiten in einem 2. Zwischenbericht [56] und Einholen von Stellungnahmen durch die Begleitgruppe.
- Phase 3: – Überprüfung und Konsolidierung der Arbeiten und Erkenntnisse aus den Phasen 1 und 2;
 - Verfassen des vorliegenden Schlussberichts unter Berücksichtigung der Stellungnahmen der Begleitgruppe zu den beiden Zwischenberichten, Bereinigung und Finalisierung des Modells sowie des Excel-Tools.

Die Ziele werden im Folgenden pro Projektphase genauer beschrieben.

3.2 Phase 1

Die Phase 1 dient dazu, Literaturwerte sowie Grundlagen aufzubereiten und so die erforderlichen Daten für die Ausarbeitung des Modells in Phase 2 bereitzustellen. Die einzelnen Ziele der Phase 1 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gliederung der Bauphase in die einzelnen Bauprozesse (Vortrieb mit Ausbruch, Ausbruchsicherung, Abdichtung, Erstellen Innengewölbe und Materialbewirtschaftung), die einzeln hinsichtlich Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bewertet werden können.
- Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen, z.B. hinsichtlich der Geologie, über geeignete Gliederungen einzelner Bauprozesse (z.B. Vortriebsmethoden und Sicherungsklassen).

- Charakterisierung der Tunnelgeometrie mittels Parametern (Länge, Innendurchmesser, Höhe Schienenoberkante, Breite Fluchtwege), aus denen die erforderlichen Materialmengen abgeleitet werden können (z.B. Ausbruchmaterial, Beton, Stahl).
- Identifikation der Parameter für die Ermittlung der relevanten Kennzahlen zu den Kosten, zum Energieverbrauch sowie zu den Treibhausgasemissionen pro Bauprozess. Relevante Parameter, deren Werte eine grosse Streubreite aufweisen, sind vertieft zu untersuchen.
- Aufzeigen der mathematischen Abhängigkeiten zwischen den Parametern der Tunnelgeometrie und den Ausmasskenngrössen (z.B. Anzahl Anker pro Laufmeter), welche den Umfang der erforderlichen Arbeiten (z.B. Zahl der zu setzenden Anker) charakterisieren.
- Recherchieren der Einheitspreise (z.B. Kosten pro Anker), um durch Verknüpfung mit den Ausmasskenngrössen additive Kostenbeiträge zu ermitteln. Analoge Recherchen sind auch für die Ermittlung des Energieverbrauchs (z.B. graue Energie pro Tonne Beton und Stahl) sowie der Treibhausgasemissionen (z.B. pro kWh Strom und pro Liter Diesel) zu tätigen.
- Erarbeitung eines Modells zur Ermittlung der Traktionsenergie für die Fahrt im Freien (abhängig von der Zuggeschwindigkeit sowie von den relevanten Fahrzeugparametern).
- Erarbeitung eines Modells, welches die Erhöhung der Traktionsenergie bei Tunnelfahrt gegenüber einer ansonsten gleichen Fahrt im Freien beschreibt (abhängig von den massgeblichen Tunnelparametern).
- Aufzeigen etablierter Methoden zur monetären Bewertung von Treibhausgasemissionen.

Im Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Phase 1, die in [55] dokumentiert sind, zusammengefasst.

3.3 Phase 2

Die Ziele der Phase 2 können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erarbeitung eines Modells zur Optimierung des Tunneldurchmessers aus Sicht Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten, jeweils über die Bau- und gesamte Nutzungsphase eines Tunnels.
- Entwicklung eines einfachen Excel-Tools für die Anwendung der Methodik an einzelnen Tunneln. Nach Eingabe aller wesentlichen Tunnelparameter durch den Anwender sollen die obigen Optimierungsgrössen automatisch ermittelt werden. Durch Variation des Tunneldurchmessers und ggf. weiterer davon abhängiger geometrischer Parameter soll der optimale Tunneldurchmesser bestimmt werden können. Die vom zu beurteilenden Tunnel unabhängigen Modellparameter (z.B. Bahnstrompreis) sollen ebenfalls angepasst werden können.
- Anwendung des Excel-Tools an ausgewählten Tunneln und Bestimmung des jeweils optimalen Tunneldurchmessers aus Sicht der drei Optimierungsansätze.

- Auswertung der Erfahrungen aus den Fallbeispielen sowie anhand von Sensitivitätsanalysen.

Die Inhalte der Phase 2 sind in [56] dokumentiert, die Kapitel 5 und 6 enthaltend dazu eine Zusammenfassung.

3.4 Phase 3

Die Phase 3 dient der Überprüfung und Konsolidierung der Arbeiten und Erkenntnisse aus den Phasen 1 und 2. Dazu soll unter der Leitung des BAV eine Validierung wichtiger Elemente des in Phase 2 entwickelten Modells vorgenommen werden.

4. Produkt 1: Literaturrecherche

4.1 Einflussgrößen in der Bauphase

4.1.1 Strukturierung der Bauprozesse im Tunnelbau

Bei den Bauprozessen ist zu unterscheiden zwischen dem eigentlichen Tunnelbaubetrieb und der Materialbewirtschaftung. In der Abbildung 4 sind die wichtigsten Bauprozesse dargestellt und farblich unterschieden. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Tunnelbaubetrieb umfasst alle Arbeiten, welche die Erstellung des Bauwerks erfordert, die sich hauptsächlich untertage abwickeln: Primär der Abbau und das Fördern des Fels- oder Bodenmaterials zum Tunnel hinaus sowie das Erstellen der Schale zur Sicherung des Hohlraums. Diese setzt sich i.d.R. aus einer ersten Ausbruchsicherung und einer permanenten Innenschale zusammen. Die Innenschale wird – aus logistischen Gründen - meist nach dem Vortrieb erstellt, kann aber auch zeitgleich zum Vortrieb im rückliegenden Teil des Tunnels erfolgen.
- Die Materialbewirtschaftung umfasst demgegenüber die Logistik und Materialflüsse, welche die Bewirtschaftung des Materials von und zur Baustelle ausserhalb des Tunnelportals verursacht. Der Hauptanteil dieser rückliegenden Prozesse ist das Wegschaffen oder Behandeln des Ausbruchmaterials. Aber auch die Beschaffung von Baumaterial, insbesondere von Gesteinskörnungen ist ein relevanter Materialfluss. Kosten und Energie wird darüber hinaus durch die Aufbereitung / Behandlung des Ausbruchmaterials generiert resp. verbraucht, dort, wo der Kreislauf zwischen Rohmaterial und Baumaterial auf dem Bauplatz geschlossen werden kann.

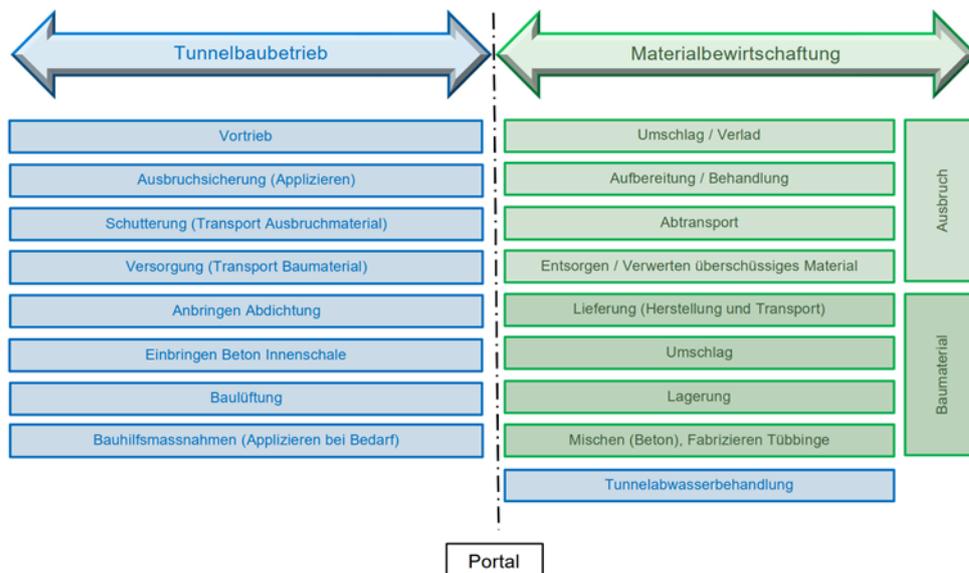


Abbildung 4: Strukturierung der Prozesse im Tunnelbau

Die sog. Tunnel-‘Bauverfahren’ setzen sich zusammen aus Methoden zum Abbau, zur Ausbruchsicherung, zur Abdichtung und zum Einbau der Innenschale. Welche Methoden gewöhnlich zusammengehören, vermittelt die folgende Tabelle 2.

	Sprengvortrieb SPV	Gripper- oder Schild-TBM TBM	Maschinen- unterstützter Vortrieb im Fels MUF	Maschinen- unterstützter Vortrieb im Lockergestein MUL	Schild mit/ohne Schneidrad SM
Abbau	Bohren und Sprengen	Bohrkopf	Abbauhammer, Reisszahn, Schrämkopf	Abbauhammer, Baggerlöffel, Reisszahn, Schrämkopf	Schneidrad, Abbauhammer, Baggerlöffel, Reisszahn, Schrämkopf
Ausbruchsicherung	Spritzbeton ~20 cm, Netze, Anker (Tübbing)			Spritzbeton ~20 cm, Netze, Stahleinbau, Stahlgitter	Tübbing
Abdichtung	Abdichtung				
Innengewölbe	Spritzbeton ~30 cm		Beton bewehrt ~30 cm		

Tabelle 2: Bauverfahren im Tunnelbau

4.1.2 Kosten Tunnel-Bauverfahren

Das Bauverfahren für den Tunnelbau unterscheidet sich je nach vorhandenem Gestein. Jedes Bauverfahren hat eine andere Vortriebsvariante, um den Hohlraum für den Tunnel zu erstellen. Der Baufortschritt ist stark abhängig von der Härte und Standsicherheit des Felsen. Nach dem Ausbruch müssen Massnahmen zur Wahrung der Arbeitssicherheit und Standsicherheit, sowie der Beschränkung der Verformungen des Gebirges im ausgebrochenen Hohlraum getroffen werden (Ausbruchsicherung).

Die Ausbruchsicherung besteht im besten Fall nur aus einer bewehrten Spritzbetonschicht oder im schlechtesten Fall zusätzlich noch aus vielen Ankern, welche unterstützt werden durch Stahlprofile. Die Innenschale bildet die Innenwand des Tunnels und der Sohlbeton ist die Grundlage für die spätere Fahrbahn.

Die Kosten für die Erstellung eines Tunnels mithilfe einer Gripper-TBM sind je nach Sicherungskategorie zwischen 20'000 CHF und 50'000 CHF pro Laufmeter für einen Radius von 5.9 m. Diese Daten stammen aus dem Generellen Projekt für die zweite Röhre des Gotthard Strassentunnels [9]. Die Rohbau-Prozesse von Strassen und Eisenbahntunnel unterscheidet sich nicht. In diesem Preis enthalten sind die Baumaterialkosten, Transportkosten und Arbeitskosten. Das Entsorgen des Ausbruchmaterials ist noch nicht berücksichtigt und wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Aus geometrischen Gründen gelten die folgenden Zusammenhänge zwischen Länge, Querschnittsfläche und Innenumfang einer Tunnelröhre einerseits und den zugehörigen Rohbaukosten, die für die vorliegende Studie massgeblich sind, andererseits:

- Die Rohbaukosten sind in guter Näherung proportional zur Röhrenlänge.
- Die Kosten für den Ausbruch und die Aufbereitung des Ausbruchmaterials sind in guter Näherung proportional zur Querschnittsfläche.

- Da die Ausbaustärke der Tunnelwand mit steigendem Durchmesser tendenziell zunimmt und das gleiche auch für die Breite der Bodenplatte gilt, nehmen die Mengen an Beton und Stahl überproportional zum Innenumfang der Tunnelröhre zu.

4.1.3 Kosten der Materialbewirtschaftung

Die Kosten zur Bewirtschaftung des anfallenden Ausbruchmaterials und zur Versorgung der Baustelle sind projektspezifisch beeinflusst und können höchst unterschiedlich ausfallen. Für jedes Grossprojekt wird ein Materialbewirtschaftungskonzept (MBK) erstellt, worin der Umgang mit dem Ausbruchmaterial anhand der projektspezifischen Randbedingungen geregelt wird. Darin wird festgelegt, in welchem Ausmass (Materialflüsse) die einzelnen Prozesse der Materialbewirtschaftung möglich / nötig sind.

Die Erfahrungswerte von Bauvorhaben, an welchen EBP beteiligt war ([15], [16], [17]) zeigen, dass die Bewirtschaftungskosten ab der Übernahme des Ausbruchmaterial vom Tunnel-Bauunternehmer (oder des Aushubmaterials vom Trasse-Bauunternehmer bei offenen Strecken) üblicherweise eine Spannweite von 12 bis 30 CHF / Tonne aufweisen¹², je nach Bedingungen und Möglichkeiten zur Entsorgung des Ausbruch- und Aushubmaterials.

Die Kostentreiber sind prinzipiell:

- Transportkosten zu den Bestimmungsorten (je nach Distanz)
- Entsorgung des Überschussmaterials, wobei die Gebühren und allfällige Erlöse von der Qualität bzw. der Verschmutzung des Materials abhängen.



Abbildung 5: Ergebnis der Ökobilanz für die Materialbewirtschaftung beim Gotthard-Basistunnel (Quelle: Studie [14])

¹² In einem Fall bis 53 CHF / Tonne.

Umschlagskosten auf dem Bauplatz fallen immer an. Fallweise fallen zudem Kosten an für die Aufbereitung bzw. Behandlung des Ausbruchmaterials, wenn dieses als Baumaterial eingesetzt werden soll (aus Sicht der Transporte idealerweise für die Eigenversorgung).

Für die Konzipierung des Materialbewirtschaftung beim Gotthard-Basistunnel wurde eine Ökobilanz [14] durchgeführt, die zeigte, dass das vorgesehene Projektkonzept mit der maximalen Verwertung von Ausbruchmaterial als Baumaterial 18 % günstiger kommt als ein Alternativkonzept, bei dem sämtliches Ausbruchmaterial deponiert und das Baumaterial mit LKW vom Markt herbeigeführt wird (bzw. 24 %, wenn dies mit der Bahn geschehen würde (siehe Abbildung 5, Bild Kosten). Nebenbei lässt sich dieser Untersuchung auch entnehmen, dass die relative Umweltbelastung um den Faktor 2.5 kleiner ausfällt (Abbildung 5, Bild Zielerfüllung).

Verhältnismässig tiefe Bewirtschaftungskosten sind möglich, wenn

- ein guter Baugrund vorliegt, der sich für eine umfangreiche Verwertung im Projekt eignet (z.B. hartes Gestein wie Kalk oder kristalline Schichten),
- das Bauverfahren mehrheitlich unverschmutztes Material produziert (keine Sprengstoffe, keine Boden-Konditionierungsmittel)
- der Baugrund keine geogenen Belastungen aufweist,
- Geländegestaltungen mit dem Ausbruch- und Aushubmaterial im Nahbereich des Anfallsortes möglich sind (unverschmutztes Material und Bewilligungsfähigkeit eines solchen Projekts vorausgesetzt – der Entledigungswille reicht grundsätzlich nicht aus),
- die Transporte zu den Ablagerungsorten mit Förderband möglich sind,
- grosse Mengen umgeschlagen werden, was den Fixkostenanteil in den Einheitskosten reduziert.

Verhältnismässig hohe Bewirtschaftungskosten sind folglich zu erwarten, wenn die oben erwähnten Bedingungen nicht vorhanden sind, insbesondere wenn

- der Baugrund ein Molassefels ist, das für die bautechnische Verwertung einschlägig als ungeeignet gilt,
- ein Transport über grössere Distanzen – meist per Bahn – nötig ist, um das Ausbruchmaterial zu entsorgen (meist zwecks Wiederauffüllung einer Materialentnahmestelle).
- viele geplante Projekte auf dieselben Entsorgungsorte («Deponien») angewiesen sind.
- Komplexe Abwicklung mit vielen überlagernden Effekten, wie das zum Beispiel beim ASTRA-Projekt der zweiten Röhre Gotthard-Strassentunnel der Fall ist (vgl. [17]):
 - in Alpen auf 1000 m.ü.M., Wintersicherheit
 - viele Bahntransporte (auch zwischen den Baustellen)
 - eine hohe Zahl an Förderbändern (teils parallele Führungen)
 - hohe Entsorgungskosten Überschussmaterial

In erster Linie wird der Kanton Zürich in naher Zukunft von vielen Projekten betroffen sein, u.a.:

- Brüttenerntunnel (Bahn)
- Viertes Gleis Bahnhof Stadelhofen (Bahn)
- Zimmerberg-Basistunnel Teil 2 (Bahn)
- Direktverbindung Aarau-Zürich (Bahn)
- Sihlhochwasserstollen (Wasserbau)
- Glattal-Autobahn (Strasse)

In der Zentral- und Nordwestschweiz sind es zwei ASTRA-Grossprojekte, welche Druck auf die Deponieräume ausüben werden:

- Bypass Luzern (Strasse)
- Rheintunnel Basel (Strasse)

Dem Kanton Zürich stellt sich angesichts dieser Ausgangslage die Frage, ob sich der Molassefels nicht besser verwerten lässt als bisher praktiziert. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) veranstaltete zu diesem Zwecke mit den SBB am 20. Juni 2019 eine Expertenanhörung, um dies herauszufinden (EBP war ebenfalls involviert). Das Fazit war jedoch, dass die Vermarktungschancen eines mergeligen Überschussmaterials weiterhin als zwiespältig zu beurteilen sind [18].

Bei der Eisenbahninfrastruktur sind die grossen Alpentunnel gebaut. Die künftigen Bahnprojekte liegen, wie oben ersichtlich, im Jura und im Mittelland. Es ist darum zu erwarten, dass hauptsächlich Schilde mit und ohne Schneidrad zum Einsatz gelangen werden, oder maschinenunterstützte Vortriebe in Fels (MUF) und / oder im Lockergestein (MUL), siehe dazu Anhang A2.1.1 vom Zwischenbericht der Phase 1. Zum ersten zählen die Weichgesteins-Tunnelbohrmaschinen (EPB und Hydroschild). Die letzteren kommen eher partiell an den Portalen oder in oberflächlich liegenden Abschnitten zum Einsatz.

In Anbetracht des Charakters der künftigen Bahntunnelprojekte stehen folglich die Prozesse Abtransport und Entsorgen / Verwerten des überschüssigen Materials in entfernten Materialentnahmestellen im Vordergrund, was die Bewirtschaftungskosten im oberen Bereich der Spannweite erwarten lässt. Der Prozess Aufbereitung / Behandlung vor Ort ist dann eine Option, wenn das Tunnelprojekt nicht ausschliesslich im Molassegestein liegt, sondern auch Homogenbereiche im Schotter umfasst.

4.2 Einflussgrößen in der Betriebsphase

4.2.1 Einleitung

Für die Berücksichtigung der Betriebsphase im Rahmen der Gesamtoptimierung des Tunneldurchmessers sind folgende Größen zu berücksichtigen:

- Kosten der Traktionsenergie,
- Treibhausgasemissionen zur Bereitstellung der notwendigen Traktionsenergie.

Anderweitige Kosten, die vom Tunneldurchmesser abhängen, gibt es nicht, oder sie sind im Vergleich zu den obigen Kosten a priori vernachlässigbar klein (z.B. Tunnelreinigung, Kleinunterhalt). Gleiches gilt für verschiedene, im Vergleich zur Traktion kleine Energieverbraucher (z.B. für Beleuchtung, Entlüftung, Abpumpen von anfallendem Tunnelwasser).

4.2.2 Traktionsenergie für den Zugbetrieb

Im Anhang A6 sind die Grundlagen für die quantitative Ermittlung der Traktionsenergie detailliert dargestellt.

Auch bei der Ermittlung der Traktionsenergie gilt, dass für die Zwecke der vorliegenden Studie nur additive Beiträge massgeblich sind, die vom Tunneldurchmesser abhängig sind.¹³ Nicht betrachtet werden müssen demnach

- eine erhöhte Traktionsenergie in Kurven (erhöhter Rollwiderstand im Vergleich zur Fahrt geradeaus),
- eine erhöhte bzw. reduzierte Traktionsenergie in Steigungen bzw. in Gefällen (die zudem für die Fahrt in Gegenrichtung mehrheitlich dank Rekuperation kompensiert wird).

Dies bedeutet, dass für die Zwecke der vorliegenden Studie der einfachste Fall einer Fahrt geradeaus ohne Steigung bzw. Gefälle betrachtet werden kann. Die nachfolgend dargestellten Formeln gelten zudem für den Fall einer konstanten Geschwindigkeit.¹⁴

Die Traktionsenergie E für eine Tunnelfahrt mit konstanter Geschwindigkeit kann wie folgt ermittelt werden:

$$E = R_T \cdot l_T = (A + B \cdot v_Z + f_T \cdot C \cdot v_Z^2) \cdot l_T$$

wobei:

R_T : Laufwiderstand im Tunnel (bremsende Kraft, wenn sie nicht durch den Antrieb kompensiert wird)

l_T : Tunnellänge

¹³ Mathematisch ausgedrückt: Die Ableitung der Traktionsenergie E_{tot} nach der freien Querschnittsfläche ($dE_{\text{tot}}/dF_{\text{ae}}$) muss ungleich Null sein. Additive Beiträge E_i zu E , für die $dE_i/dF_{\text{ae}} = 0$ gilt, können vernachlässigt werden. Dies gilt nicht für multiplikative Faktoren (wie Anzahl Zugfahrten oder Wirkungsgrad von Transformatoren oder Fahrmotoren).

¹⁴ Die für eine Beschleunigung notwendige Antriebsenergie hängt ebenfalls nicht vom Tunneldurchmesser ab, so dass auch nicht die Beschleunigungsenergie, sondern nur der damit verbundene stetig steigende Luftwiderstand (infolge erhöhter Geschwindigkeit) massgeblich ist. Die Beschleunigungsenergie «als solche» muss deshalb nicht betrachtet werden.

- A: Rollwiderstand
- B: Impulswiderstandsparameter
- C: Luftwiderstandsparameter im Freien¹⁵
- f_T : Tunnelfaktor (beschreibt Erhöhung Luftwiderstand bei Tunnelfahrt im Vergleich zu einer offenen Strecke)
- v_Z : Zuggeschwindigkeit¹⁶

Primär der dritte Summand proportional zu v_Z^2 hängt vom Tunneldurchmesser ab; eine schwache Abhängigkeit hat man zudem beim zweiten Summanden proportional zu v_Z , wobei der Beitrag dieses Terms generell deutlich kleiner ist. Der Rollwiderstand ist vollkommen unabhängig vom Tunnelquerschnitt und wird nur berücksichtigt, um berechnete Werte im Rahmen der Modellverifikation einfacher mit gemessenen Werten vergleichen zu können. Somit sind neben der explizit in der obigen Formel aufgeführten Zuggeschwindigkeit v_Z primär der Luftwiderstand im Freien sowie dessen Erhöhung bei Tunnelfahrt in Form des mittleren Tunnelfaktors f_T für die vorliegende Studie relevant.

Der Luftwiderstand im Freien hängt von der Querschnittsfläche des Zuges, von dessen Länge sowie der Form des führenden Fahrzeugs ab; letztere werden in einem dimensionslosen Luftwiderstandsbeiwert $c_{w,fs}$ berücksichtigt, der durch Simulationen oder Messungen ermittelt wird. Typische Werte sind in Anhang A6.2 (vgl. Tabelle 30) dargestellt.

Der Tunnelfaktor hängt insbesondere von der freien Tunnelquerschnittsfläche F_{ae} ab; weiter wird er beeinflusst von der Zugquerschnittsfläche und der Zuglänge. Die Tunnellänge hat nur einen sehr untergeordneten Einfluss. Typische Tunnelfaktoren bewegen sich zwischen ca. 1.3 und 1.8, d.h. der Luftwiderstand im Tunnel ist zwischen 30 % und 80 % höher als im Freien.

Je höher die Geschwindigkeit, desto stärker dominiert auch im Freien der vom Luftwiderstand abhängige Term proportional zu v_Z^2 . Dies gilt insbesondere im schnellen Reisezugverkehr (ab ca. 120 km/h). Im Tunnel ist dies nochmals ausgeprägter der Fall. Für das vorliegende Projekt ist es deshalb wichtig, den Luftwiderstand im Tunnel korrekt abzubilden.

In Abbildung 6 ist die Abhängigkeit der für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit v_Z durch einen Tunnel notwendigen Traktionsenergie an einem Beispiel dargestellt. Die Zahlen unterhalb der Kuchendiagramme beschreiben die relative Änderung der Traktionsenergie für die drei betrachteten Geschwindigkeiten. Die Zahlen innerhalb der Kuchendiagramme beschreiben den Anteil der drei bremsenden Widerstandskräfte am gesamten Fahrwiderstand für die jeweilige Geschwindigkeit.

15 $B \cdot v_Z$ bzw. $f_T \cdot C \cdot v_Z^2$ sind Widerstände bzw. Kräfte, so dass B und C von den Einheiten her keine Widerstände bzw. Kräfte sind (deshalb wird in den beiden Bezeichnungen der Begriff Parameter verwendet).

16 Die Formel zur Berechnung des Laufwiderstands gibt die Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit v_Z (Polynom 2. Grades) als Näherungsgleichung wieder. Abweichungen von der polynomialen Abhängigkeit äussern sich darin, dass auch die Parameter B und f_T bzw. C eine gewisse, wenn auch eher schwache Abhängigkeit von v_Z aufweisen.

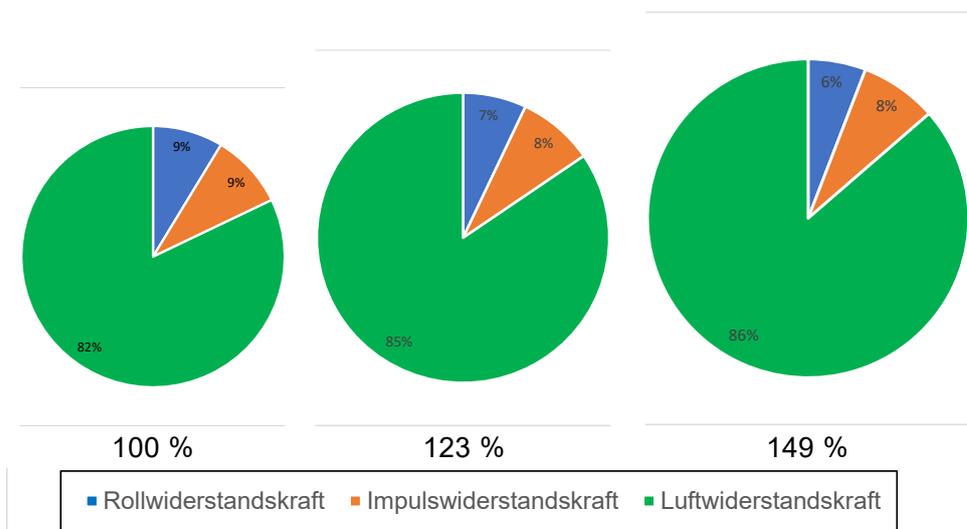


Abbildung 6: Relative Beiträge der drei bremsenden Kräfte zur Traktionsenergie, um eine konstante Geschwindigkeit bei Tunnelfahrt aufrechtzuerhalten (approximative Zahlen für eine Fahrt des Hochgeschwindigkeitszugs 2x RABe 501 (Giruno) mit 160 (links), 180 (Mitte) bzw. 200 km/h (rechts) durch einen Tunnel mit einer freien Querschnittsfläche von 75 m² (d. h. Innendurchmesser 10.5 m)).

4.3 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen

4.3.1 Zahlenwerte für die Energie- und Baumaterialproduktion

Im vorliegenden Projekt werden die Klimawirkungen anhand der Treibhausgasemissionen bewertet. Es wird eine vom International Panel on Climate Change (IPCC) im Jahr 2014 veröffentlichte Methodik [54] verwendet. Mit dieser Methodik werden alle klimawirksamen Emissionen (z.B. CO₂, CH₄, N₂O) erfasst und deren Treibhausgaswirkung über einen Zeitraum von 100 Jahren bewertet. Die Resultate werden in Form von CO₂-Äquivalenten (CO₂-eq) ausgewiesen, wobei jedes Treibhausgas aufgrund seiner relativen Treibhausgaswirkung gewichtet wird.

Kennzahlen zum Energieverbrauch sowie den Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb eines Bahntunnels sind in Tabelle 3 dargestellt.

Produkt	Einheit	KEA ^{17**} (kWh)	kg CO ₂ eq.	Bemerkung
Bahnstrom Jahr 2021	kWh	–	0.0062	Produktion von Strom für die SBB. (Die Primärenergie entfällt primär auf Wasserkraft (90 %) Der ab 2025 ausschliesslich erneuerbar erzeugte Bahnstrom kann approximiert werden durch die Kennzahl «Schweizer Strommix Mittelspannung zertifiziert»
Bahnstrom Zukunft	kWh	–	0.0059	Der ab 2025 ausschliesslich erneuerbar erzeugte Bahnstrom kann approximiert werden durch den Ersatz des heute noch nicht erneuerbaren Anteils mit dem zertifizierten Strommix in der Schweiz. Besteht primär aus Wasserkraft, gefolgt von Energie aus Biomasse und Weiteren.
Schweizer Strommix Niederspannung	kWh	–	0.105	Strom Niederspannung Verwendung für Baustellenstrom (ohne Grossverbraucher wie TBM).
Beton	m ³	232	205	Beton für hohe Anforderungen. Annahme, dass Beton so für den Tunnelbau hergestellt wird (Spritzbeton und Konstruktionsbeton sind nicht in Ecoinvent enthalten). Transport und Mischvorgang, sowie die beigemischten Stoffe (insb. Zement) sind noch nicht berücksichtigt – werden aber vergleichsweise gering sein. Der Transport kann berücksichtigt werden mit der Kennzahl für «Transport Camion» oder «Transport Güterzug».
Stahl	kg	7.0	2.04	Betonstahl Herstellung von Stahl, ohne Transport zum Tunnel. Der Transport kann berücksichtigt werden mit der Kennzahl für «Transport Camion» oder «Transport Güterzug».
PVC	kg	17.1	2.59	PVC Herstellung von Kunststoff, ohne Herstellung der Abdichtungsplatten und Transport zum Tunnel.
Transport Güterzug	tkm	0.181	0.0144	Transport im Güterzug, CH
Transport Camion	tkm	0.739	0.162	Transport im Camion, EURO6, Europa, 16-32 t

Tabelle 3: Energieverbrauch (in kWh) sowie Treibhausgasemissionen (in kg CO₂ eq.) über den Lebenszyklus der wichtigsten im Tunnelbau eingesetzten Stoffe und Materialien gemäss Ecoinvent v 3.6.

4.3.2 Monetarisierung der Treibhausgasemissionen

Treibhausgasemissionen (inkl. «grauer Emissionen», d.h. Treibhausgasemissionen zur Herstellung von Baustoffen und anderen Produkten) lassen sich monetarisieren, indem jeder emittierten t CO₂ eq. ein Preis zugewiesen wird. Die vier gängigen Ansätze sind in Tabelle 4 beschrieben.

17 KEA: Kumulierter Energieaufwand (Energiebedarf in kWh für die Produktion einer Standardmenge eines definierten Stoffes); für Strom sind die Werte nicht relevant.

Methode/ Ansatz	Beschrieb
Marginal abatement cost	Sogenannte Vermeidungskosten, die anfallen für die Umsetzung von Massnahmen zur Reduktion der Emissionen [45]. Dieser Ansatz eignet sich zur Beurteilung und Auswahl möglichst «günstiger» Massnahmen zur Erreichung eines bestimmten Ziels.
Kosten gemäss CO ₂ -Abgabe	Eine Lenkungsabgabe, die jeweils erhöht wird, wenn der Zielpfad der Emissionsreduktion überschritten wurde. Verschiedene Länder setzen dieses Instrument ein. In der Schweiz wird seit 2010 auf Brennstoffe (z.B. Heizöl, Erdgas, Kohle), nicht jedoch auf Treibstoffe, eine CO ₂ -Abgabe erhoben. Die Höhe der Abgabe wurde seit ihrer Einführung 5-mal angepasst; letztmals wurde sie per 1.1.2022 von CHF 96 auf 120 pro Tonne CO ₂ -eq erhöht [46]. Ausland (Beispiele): DE: 25 EUR/ t CO₂-eq [47], SE: 114 EUR/ t CO₂-eq [48] Firmenintern: 1 – 350 USD/ t CO₂-eq je nach Unternehmen [49]. Wenn bereits ein Klimaziel vorhanden ist, aber offen ist, wie es zu erreichen ist, bietet sich der Ansatz «Kosten gem. CO ₂ Abgabe» an.
Kosten für Kompensationsprojekte	Kompensationsprogramme gibt es in verschiedenen Ländern. Der Preis spiegelt die aktuellen und lokalen Kosten zur CO ₂ -Vermeidung. Programme in der Schweiz: typischerweise 90 - 120 CHF/ t CO₂-eq . Programme im Ausland: ca. 26 CHF/ t CO₂-eq Quelle: Expertenwissen EBP aus Kompensationsprojekten im In- und Ausland Dieser Ansatz eignet sich, um Akteure dazu zu motivieren, Investitionen in klimafreundliche Technologien zu tätigen.
Preise für gehandelte Zertifikate	CH-Emissionshandel: 5.15 – 18.15 CHF/ t CO₂-eq [50] EU-Emissionshandel: 27 CHF/ t CO₂-eq, (Stand Anf. Jan 2020, 25 EUR) [51] Dieser Ansatz eignet sich nicht für das vorliegende Projekt. Die Preise der gehandelten Zertifikate hängen primär davon ab, wie viele davon an welche Akteure vergeben werden. Sie spiegeln den «Schaden» durch CO ₂ -Emissionen, oder die Kosten von Massnahmen nicht direkt wider.

Tabelle 4: Ansätze zur Monetarisierung von Treibhausgasemissionen.

Für das vorliegende Projekt bietet sich der Ansatz «Kosten gemäss CO₂ Abgabe» an. In Bezug auf die Höhe des Betrages wird vorgeschlagen, vergleichbare Kosten einzusetzen, die in anderen Sektoren zu einem befriedigenden Absenkpfad der Emissionen hin zu einem definierten Klimaziel führen. Die SBB haben bereits ein Klimaziel, welches besagt, die Emissionen bis 2030 zu halbieren und verbleibende Emissionen zu kompensieren; bis 2040 sollen die Emissionen um 90 % reduziert werden. Der Bundesrat hat 2019 ein Netto-Null-Ziel für 2050 beschlossen [52]. Für das Projekt GrETu wird der maximaler Wert von 210 CHF/ t CO₂-eq verwendet, welcher in der Totalrevision des CO₂-Gesetzes vom 25. Januar 2021 als CO₂-Abgabe für Brennstoffe vorgeschlagen war (vgl. [53]).¹⁸

¹⁸ Gegen das CO₂-Gesetz wurde das Referendum ergriffen und die Vorlage wurde an der Volksabstimmung vom

4.4 Zusammenfassung Erkenntnisse aus Phase 1

In der Phase 1 werden beim jeweiligen Fachthema eine Vielzahl von dort massgeblichen mathematischen Abhängigkeiten dargestellt. Über die Tunnellänge hinaus, welche praktisch immer zu proportional höheren Kosten, Energieverbräuchen sowie Treibhausgasemissionen führt¹⁹, finden sich Angaben zu folgenden Zusammenhängen:

- Die Ausbruchmenge und damit alle Kosten, Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit Ausbruch sowie Materialbewirtschaftung nehmen proportional zur ausgebrochenen Querschnittsfläche zu.
- Die verbauten Stoffmengen nehmen in der Regel proportional zum Umfang des Tunnels zu. Gleiches gilt folglich auch für die zugehörigen Transporte sowie Arbeitsprozesse (z.B. Abdichtung, Ausbruchsicherung, Abdichtung, Erstellung Innengewölbe).
- Neben dem Betriebsprogramm (Zahl und Art der verkehrenden Züge) haben der Verlauf der Zuggeschwindigkeit entlang des Tunnels und die freie Tunnelquerschnittsfläche den grössten Einfluss auf die Traktionsenergie. Der Querschnitt der Züge hat ebenfalls einen merklichen Einfluss (z.B. ist der Luftwiderstand eines Doppelstockreisezugwagens grösser als derjenige von einstöckigen Wagen).

In der vorhandenen Literatur sowie in den bestehenden Grundlagen sind viele Informationen über die Bauprozesse, -Kosten und die Traktionsenergie zu finden. Über den Energieverbrauch während des Baus ist hingegen nur wenig Literatur verfügbar.

¹⁹ Ausnahme: Der Tunnelfaktor (Quotient zwischen der Traktionsenergie im Tunnel und derjenigen bei Fahrt im Freien) hängt nimmt mit der Tunnellänge zu. Die Traktionsenergie für das Durchfahren eines Tunnels nimmt deshalb stärker als lediglich proportional zur Tunnellänge zu.

5. Produkt 2: Optimierungsmodell

5.1 Optimierungsgrößen

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Größen aufgeführt, die im Hinblick auf eine möglichst optimale Wahl des Innendurchmessers bzw. der freien Querschnittsfläche eines kreisförmig ausgebrochenen Tunnels analysiert werden. Folgende drei Optimierungsgrößen werden betrachtet:

- Energieverbrauch während der Bauphase (für Herstellung und Transport von Baustoffen, Transport und Aufbereitung von Ausbruchmaterial sowie alle Bauverfahren im Rahmen des Rohbaus) sowie der Betriebsphase (Traktionsenergie für das Betriebsprogramm).
- Treibhausgasemissionen der gleichen (oben genannten) Prozesse, die auch hinsichtlich Energieverbrauch analysiert werden.
- Gesamtkosten, bestehende aus den Kosten für den Rohbau (die dabei anfallenden Energiekosten sind in den Kostenkenngrößen enthalten), den Traktionsenergiekosten sowie monetarisierten Treibhausgasemissionen.

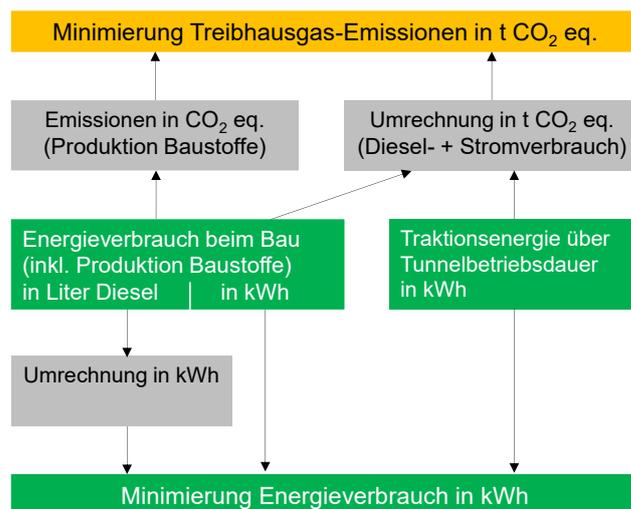


Abbildung 7: Vorgehen zur Minimierung des Energieverbrauchs (in kWh) sowie der Treibhausgasemissionen (in t CO₂ eq.)

Die Rohbauphase dauert nur wenige Jahre, während die Betriebsphase sich über mehrere Jahrzehnte erstreckt (ca. 80 – 100 Jahre). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden – wie in solchen Fällen üblich – zukünftig anfallende Kosten mit einem einheitlichen Jahreszins von 2 % diskontiert und auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels umgerechnet.

«Indirekte» Effekte eines reduzierten Energieverbrauchs auf die Treibhausgasemissionen werden nicht betrachtet. So wird z.B. nicht berücksichtigt, dass eine eingesparte kWh nachhaltig produzierter Bahnstrom grundsätzlich über den Strommarkt verkauft und dabei eine kWh ersetzen kann, welche mit höheren Treibhausgasemissionen produziert werde.

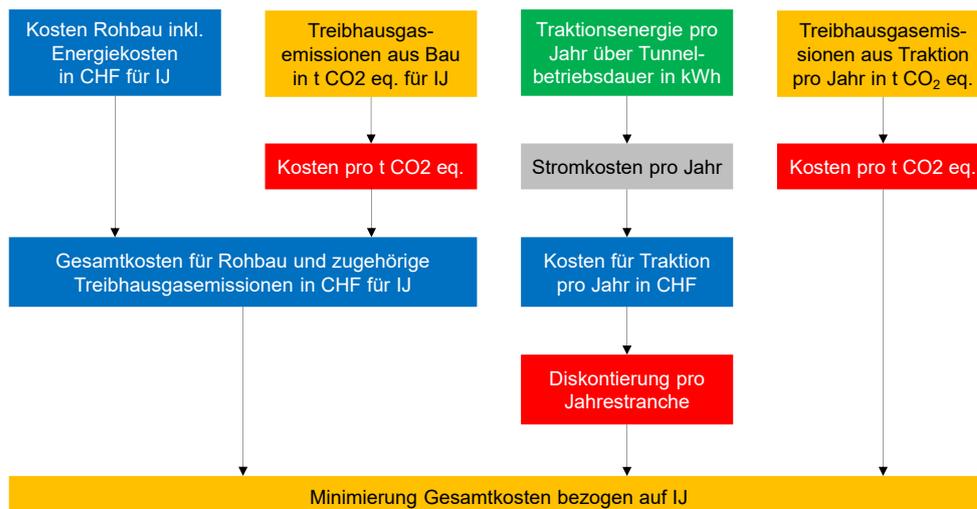


Abbildung 8: Vorgehen zur Minimierung der Gesamtkosten in CHF bezogen auf das Inbetriebnahmejahr (IJ) des zu beurteilenden Tunnels

5.2 Ermittlung Rohbaukosten

Die Ausarbeitung des für GrETu entwickelten bottom-up-Rohbaukostenmodells basiert auf den nachfolgend beschriebenen Strukturierungsebenen, Grundlagen und Vorgehensweisen.

Gliederung in Bauprozesse

Die folgenden Rohbauprozesse werden einzeln analysiert und die zugehörigen Kosten- und/oder Energieverbrauchs-Kenngrößen ausgewiesen (und anschliessend aggregiert):

- Antransport von Baustoffen und -materialien zum Ort des Zwischenantritts (z.B. Portal)
- Transport des Bau- und Ausbruchmaterials im Tunnel (zwischen Portal und Ortsbrust in beide Richtungen)
- Vortrieb des Tunnels
- Anbringen Ausbruchsicherung
- Einbau Abdichtung
- Erstellen von Innengewölbe, Sohle und beidseitigen Banketten
- Materialbewirtschaftung (Aufbereitung und Wiederverwertung des Ausbruchmaterials)

Diese Liste beinhaltet nicht alle Bauprozesse einer Tunnelbaustelle. Die für das Modell ignorierten Prozesse sind nicht vom Durchmesser abhängig und wurden daher weggelassen.

Unterscheidung nach Vortriebsverfahren

Die Rohbaukosten sowie der erforderliche Energieverbrauch für die zugehörigen Bauprozesse hängen stark von dem gewählten Vortriebsverfahren ab. Die Unterteilung wird analog zur Übersicht in der SIA 197/1 [4] Anhang C gewählt. Die fünf Verfahren sind:

- Sprengvortrieb im Fels (SPV)
- Tunnelbohrmaschinen-Vortrieb im Fels (TBM)
- Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF)
- Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL)
- Schildmaschinen-Vortrieb (SM)

Beim SM-Vortrieb wird auch zwischen den verschiedenen Schildvarianten (mechanisch, Hydro- und Erddruckschild) unterschieden. Die Wahl des Vortriebsverfahrens ist abhängig von der Stabilität und Festigkeit des Gebirges bzw. des vorhandenen Lockergesteins. Diese Parameter können mit den Sicherungsklassen (SK1 – SK5) vereinfacht eingegeben werden. Liegen keine Daten vor, gibt es vordefinierte Werte für den Sicherungs-aufwand/Ausbaukonzepte. Zur Vereinfachung des Modells wird angenommen, dass eine Ausbruchsicherung mithilfe von Tübbing nur beim SM-Vortrieb praktiziert wird.

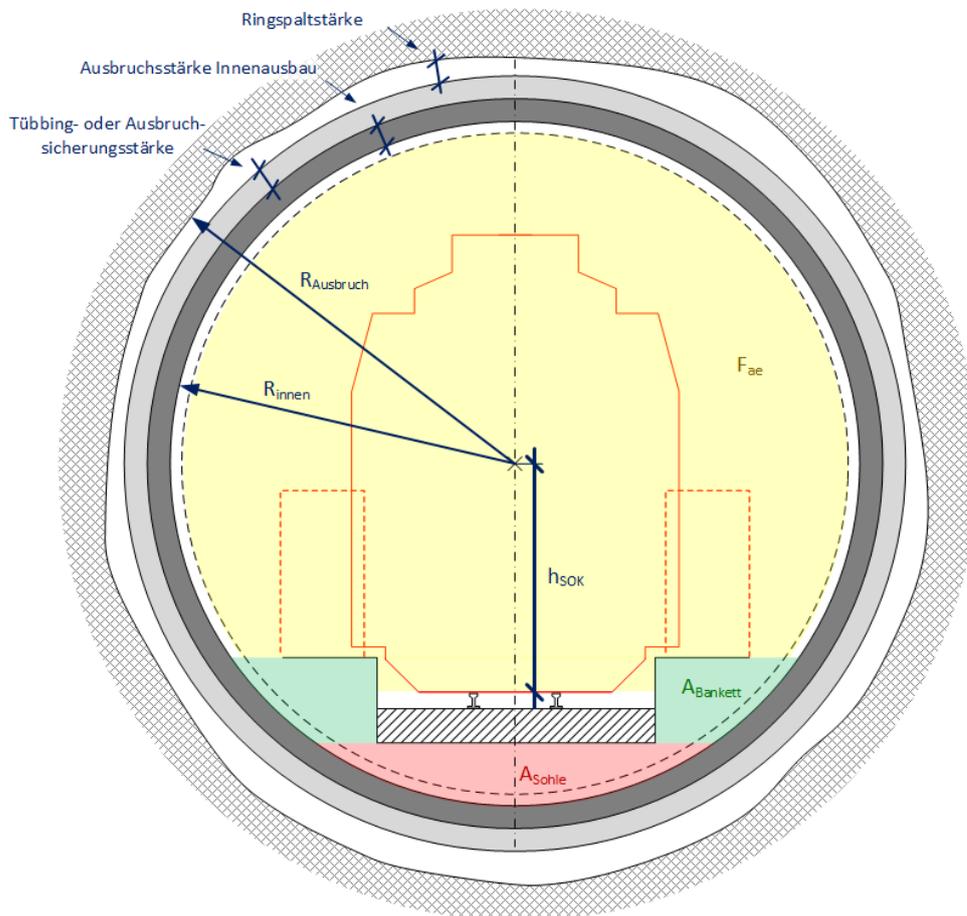


Abbildung 9: Schema Aufbau Tunnel, Einbauten und massgebliche geometrische Größen. Die freie Querschnittsfläche F_{ae} ist gelb dargestellt. Die grau dargestellte Fahrbahnplatte wird nicht berücksichtigt, da sie nicht vom Innendurchmesser Rinnen abhängt.

Geometrische Grundlagen: Tunnelprofil, freie Querschnittsfläche und Tunnellänge

Die erforderlichen Mengen an Baumaterialien hängen stark vom Querschnittsprofil, den Dicken der verschiedenen Elemente der Tunnelwand sowie der Tunnelleinbauten (z.B. Bankette) und der Tunnellänge ab. Ergänzend

zu den Aussagen in Kapitel 4.1.2 ist Folgendes zu beachten (vgl. Abbildung 9 für den Fall eines Einspurtunnels):

- Mit zunehmendem freien Tunnelquerschnitt F_{ae} nimmt nach den Gesetzen der Aerodynamik der Luftwiderstand im Tunnel und damit die erforderliche Traktionsenergie ab.
- Bei gegebenem Innendurchmesser ist F_{ae} umso grösser, je grösser der Abstand h_{SOK} zwischen der Schienenoberkante und dem Tunnelmittelpunkt ist (d.h. je tiefer die Schienen und Bankette angeordnet sind).
- Eine Obergrenze für h_{SOK} ergibt sich aus den folgenden Randbedingungen:
 - Das geltende Lichtraumprofil muss Platz finden und im Falle eines Doppelspurtunnels der minimale Gleisabstand, der von der maximalen Geschwindigkeit abhängt, eingehalten werden. Die geltenden Vorgaben sind in den AB-EBV festgehalten.
 - Die Bankette müssen der Dienstweg und aus Sicherheitsgründen (Selbstrettung von Reisenden aus einem verunfallten Zug) beidseits²⁰ eine Mindestbreite von 100 cm aufweisen.²¹
 - Zwischen der Tunnelsohle und den Banketten muss der Platz genügen, um die vorgesehene Infrastruktur (in der Regel Leitungen) durchführen zu können. Im Modell wird angenommen, dass dafür 30 cm benötigt werden. Abbildung 10 zeigt, wo dieser Mindestabstand gewährleistet sein muss.

Abbildung 9 stellt anschaulich dar, welche geometrischen Parameter den Zusammenhang zwischen $R_{Ausbruch}$, R_{innen} (inklusive bautechnischer Nutzraum t) und F_{ae} bestimmen. Auf dieser geometrischen Basis werden für definierte Werte von R_{innen} und h_{SOK} F_{ae} bestimmt und die erforderlichen (bzw. beim Ausbruchmaterial anfallenden) Materialmengen pro Bauprozess ermittelt. Die resultierenden Werte bilden eine wichtige Grundlage für die Einschätzung der Kosten- und Energiekenngrössen.

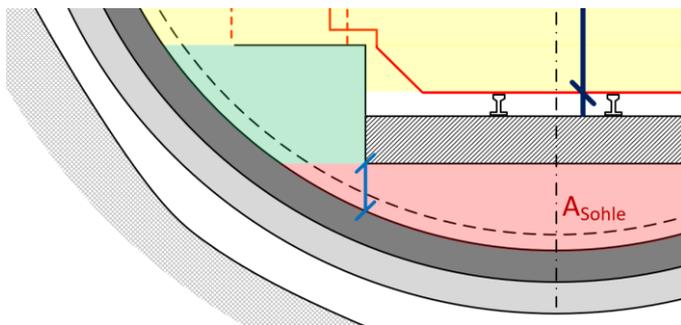


Abbildung 10: Mindestabstand zwischen Fahrbahnplatte und Innenverkleidung (blau)

20 Bei einem Einspurtunnel müsste gemäss [1] nur ein einseitiger Fluchtweg vorhanden sein. Für runde Tunnelprofile ist der Fluchtweg jedoch nicht die massgebende Randbedingung.

21 Bei einzelnen Tunneln werden breitere Bankette geplant, damit diese für schmale Fahrzeuge befahrbar sind. Dies erleichtert den betrieblichen Unterhalt und hilft, dass dieser kostengünstiger und mit kürzeren Tunnelsperrungen erbracht werden kann.

Grundsätzliches Vorgehen für die Modellierung der Rohbaukosten

Pro Vortriebsverfahren wird ein separates Teil-Kostenmodell entwickelt, da sich die Bauprozesse und deren Kosten zum Teil massgeblich unterscheiden. Die Prozesse und deren Abhängigkeiten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Bauprozess	Subprozesse	Abhängigkeit
Vortrieb	–	Ausbruchfläche, Tunnellänge, Aufteilung in Sicherungsklassen
Ausbruchsicherung	Anker (SPV, TBM, MUF)	Ausbruchumfang, Anzahl Anker pro Laufmeter, Tunnellänge, Aufteilung in Sicherungsklassen
	Bewehrung (SPV, TBM, MUF, MUL)	Ausbruchumfang, Tonne Bewehrung pro Laufmeter, Tunnellänge, Aufteilung in Sicherungsklassen
	Stahleinbau (SPV, TBM, MUF, MUL)	Umfang Ausbruchsicherung, Tonne Stahl pro Laufmeter, Tunnellänge, Aufteilung in Sicherungsklassen
	Spritzbeton (SPV, TBM, MUF, MUL)	Umfang und Stärke Ausbruchsicherung, Tunnellänge
	Tübbing, Beton und Stahl (SM)	Umfang, Stärke und Bewehrungsgehalt Tübbing, Tunnellänge
	Hinterfüllung (SM)	Umfang und Stärke Ringspalt, Anteil gebundenes Material Hinterfüllung, Tunnellänge
Abdichtung	–	Umfang Ausbruchsicherung und Abdichtungskonzept, Tunnellänge
Innen-ausbau	Beton	Umfang und Stärke Innengewölbe, Tunnellänge
	Beton Sohle und Bankett	Fläche von Sohle und Bankett, Anteil gebundenes Material in Sohle, Tunnellänge
	Kies Sohle	Fläche von Sohle und Anteil ungebundenes Material in Sohle, Tunnellänge
	Bewehrung Bankett	Fläche von Bankett, Bewehrungsgehalt Bankett, Tunnellänge
Materialbewirtschaftung	Aufschüttung (lokal, extern)	Prozentuale Verteilung auf verschiedene Verwertungen
	Betonzuschlag	
	Herstellung von Baustoffen (lokal, extern)	
	Deponie	

Tabelle 5: Abhängigkeiten der einzelnen Bauprozessen

Die in Tabelle 5 beschriebenen Bauprozesse werden mit den jeweiligen Einheitskosten und Materialabhängigkeiten zu einem Ausmass (Menge des Bauwerkstoffs), Preis und Materialmenge kombiniert. Zuerst wird das Ausmass in der Abhängigkeit des Einheitspreises (z.B. Anzahl Anker) berechnet. Die Multiplikation des Ausmasses und des Einheitspreises ergibt die Kosten für den Subprozess. Um die benutzten Materialien zu aggregieren, werden alle benutzten Baustoffe in fünf Materialgrössen umgerechnet. Diese fünf sind: Ausbruchmaterial, Beton, Stahl, Kunststoff und Kies. Die nachstehende Tabelle zeigt die Vorgehensweise anhand eines Beispiels für den TBM-Vortrieb.

Prozess	Einheit	Einheitspreis (EHP)	Material	Material / Einheit
Vortrieb – SK 1	m ³	CHF 70	Ausbruchmaterial m ³	1

Tabelle 6: Auszug aus TBM Bauprozess für Kosten- und Materialberechnung

Daraus ergeben sich folgende Formeln für das Ausmass (A), Preis (P) und Material (M):

$$A_{Vortrieb,SK\ 1} = F_{Ausbruch} \cdot l_{Bauabsch.} \cdot SK1\%$$

$$P_{Vortrieb,SK\ 1} = A_{Vortrieb,SK\ 1} \cdot 70\ Fr./m^3$$

$$M_{Vortrieb,SK\ 1} = A_{Vortrieb,SK\ 1} \cdot 1$$

Das Ausmass für den Vortrieb – SK 1 ergibt sich aus der Ausbruchfläche ($F_{Ausbruch}$) mal die Länge des aktuellen Bauabschnittes ($l_{Bauabsch.}$) und dem prozentualen Anteil der SK 1 im Bauabschnitt ($SK1\%$). Je nach Bauprozess ist die geometrische Abhängigkeit an die Fläche (Bsp. Ausbruch) oder den jeweiligen Umfang (Bsp. Abdichtung) gekoppelt.

Als «Nebenprodukt» des obigen Vorgehens lassen sich für alle Ressourcen (Baustoffe und -materialien) Verbrauchs- und ggf. Transportmengen (in Tonnen-km) zuordnen. Auf dieser Basis lassen sich die entsprechenden grauen Energien für deren Herstellung sowie den Energieverbrauch für Transporte ermitteln.

5.3 Ermittlung Energieverbrauch im Bau und zugehörige Treibhausgasemissionen

Einheitspreise enthalten normalerweise alle relevanten Kostenbeiträge, beispielsweise für den Energieverbrauch, aber auch für Lohnkosten. Energiekosten sind deshalb subsummiert und sind nicht separat ausgewiesen. Einzige Daten zur maximalen Leistungsaufnahme auf einer Baustelle sind bekannt, da dies eine Planungsgrösse für den erforderlichen Stromanschluss und dessen Absicherung ist. Aus der maximalen Leistung lässt sich nicht abschätzen, wie hoch der mittlere Energiebedarf insgesamt bzw. für die einzelnen Bauprozesse ist. Nur Tunnelbauunternehmen verfügen über zuverlässiges Zahlenmaterial, da sie die Stromrechnungen bezahlen. Es erwies sich als sehr schwierig, hierzu belastbare Daten zu erhalten.

Die meisten Zahlen zum Energieverbrauch stammen aus der Literatur ([20] - [25]). Einige Werte wurden zudem von einer grossen Tunnelbaufirma unter der Bedingung zur Verfügung gestellt, dass weder die Zahlenwerte noch deren Herkunft dokumentiert werden. Da in der Literatur oft nur eine Bandbreite angegeben wird, welche zudem von der Quelle abhängt, mussten die Autoren der vorliegenden Studie Annahmen hinsichtlich der zu verwendenden Werte treffen. Die verwendeten Werte sind im Anhang A5.2 dokumentiert.

In einem zweiten Schritt werden die Treibhausgasemissionen aus dem Energieverbrauch berechnet. Die Grundlagen für die Umrechnung von verbrauchtem Strom und Diesel in Treibhausgasemissionen (gemessen in

t CO₂-Äquivalent) basieren auf der Lebenszyklus-Analyse-Software SimaPro [42].

Nicht berücksichtigt wurde die graue Energie zur Herstellung und zum An- bzw. Abtransport des für den Tunnelbau erforderlichen Maschinenparks. Einerseits ist die Zuordnung zu einzelnen Projekten schwierig, da Maschinen wie z.B. TBM in der Regel nach einer umfassenden Demontage, Revision und Wiederverwendung von Maschinenteilen auf weiteren Tunnelbaustellen eingesetzt werden. Zudem ist es praktisch nicht möglich, für komplexe Maschinen wie TBM, von denen es unzählige Varianten gibt, Literaturwerte zur grauen Energie zu finden.

Ausserdem zeigt die Analyse, dass die Treibhausgasemissionen, die auf einer Tunnelbaustelle anfallen, um einen Faktor 10 bzw. 50 kleiner sind als für die Herstellung der erforderlichen Baumaterialien sowie deren Transport. Die einer Tunnelbaustelle zuordnungsbarer graue Energie für die Bereitstellung des Maschinen- und Fahrzeugparks fällt im Vergleich zur grauen Energie der Baumaterialien ebenfalls nicht ins Gewicht.

5.4 Ermittlung Traktionsenergie und zugehörige Treibhausgasemissionen

Die Analyse der vom Tunneldurchmesser abhängigen Kosten, Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen gestaltet sich für die Betriebsphase deutlich einfacher als für die Bauphase, da diese ausschliesslich von der Traktionsenergie abhängen. Wie in Tabelle 1 begründet, können weitere Aktivitäten während der Betriebsphase (z.B. Unterhaltsarbeiten) vernachlässigt werden, da Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Zugtraktion unbedeutend sind.

Traktionsenergie

Nachfolgend wird dargestellt wie der in Kapitel 4.2.2 sowie Anhang A6 dokumentierte Ansatz zur Ermittlung der Traktionsenergie im Berechnungsmodell umgesetzt wird.

Die Traktionsenergie hängt von der Zugkomposition ab. In Tabelle 7 sind die Reise- und Güterzugkompositionen aufgeführt, die im Rahmen des Optimierungsmodells betrachtet und für welche die Traktionsenergie ermittelt wird. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Variabilität der vorkommenden Zugkompositionen beim Güterverkehr in der Realität viel grösser ist, als was im Optimierungsmodell sinnvoll abgebildet werden kann. Eine grössere Zahl von Zugkompositionen wäre für die Anwendung bei zukünftigen Tunnels wenig hilfreich, weil während der Planungsphase noch nicht klar ist, wie viele Zugkompositionen in z.B. fein abgestuften Längenklassen zukünftig durch den Tunnel fahren werden. Solange die für die Modellanwendung veranschlagten Zugfahrten eine vergleichbare mittlere Länge aufweisen wie die effektiv verkehrenden Züge, resultieren aus der beschränkten Zahl von wählbaren Zugkompositionen keine signifikant anderen Ergebnisse.

Zugkategorie	Zugtyp	Bezeichnung SBB / Unterteilung	Länge [m]	Bemerkung
Triebzug	Giruno	RABe 501	202	Einfachtraktion
			404	Doppeltraktion
	FV-Dosto	RABe 502	201	Einfachtraktion
			401	Doppeltraktion
	KISS	RABe 511	100	Kombinationen von 4- und 6-teiligen Zügen in Einfach- und Doppeltraktion
			150	
			200	
			300	
	FLIRT	RABe 521	75	wichtigste Kombinationen von Zügen mit unterschiedlicher Zahl von Mittelwagen in Einfach- bis Dreifachtraktion
			105	
			150	
210				
225				
lokbespannter Güterzug (Re 482)	Standard-GZ	Zugreihe A70	300	bunt gemischt (WLV, UKV)
				Ganzzug (homogen)
			600	bunt gemischt (WLV, UKV)
				Ganzzug (homogen)
	CEX (Cargo-Express)	Zugreihe A90	250	mit Containerwagen (KEP, Post)
				mit Schiebewandwagen

Tabelle 7: Im Rahmen des Optimierungsmodells betrachtete Zugkompositionen, für die die Traktionsenergie ermittelt wird.

Weitere betriebliche Grössen, die einen Einfluss auf die jährliche Traktionsenergie für das Befahren eines Tunnels haben, sind:

— gefahrene Geschwindigkeit: Für das Optimierungsmodell wird im Sinne einer Vereinfachung ein stückweise lineares Profil entlang des Tunnels angenommen, welches infolge der Wirkung von Steigungs- bzw. Gefällestrecken pro Fahrtrichtung festzulegen ist. Die in der Praxis vorhandene Abhängigkeit von der Zugkomposition wird vereinfacht berücksichtigt, indem Werte im Geschwindigkeitsprofil, die über der Höchstgeschwindigkeit der jeweiligen Zugkomposition liegen, auf letztere begrenzt werden.²² Weitere Kompositions-abhängige Einflüsse auf das Geschwindigkeitsprofil, wie z.B. die Traktionsleistung von Lokomotiven oder angetriebenen Wagen, können nicht berücksichtigt werden.

— mittlere Zahl der Zugfahrten pro Zugkomposition, Tag und Fahrtrichtung. Ausgehend vom Fahrwiderstand, der von der Zugkomposition, der Fahrgeschwindigkeit sowie dem Tunnel abhängig ist, kann die Traktionsenergie pro Zugfahrt und Tunnelabschnitt (charakterisiert durch einen linearen Geschwindigkeitsverlauf) ermittelt werden. Durch Summation über alle Tunnelabschnitte und Zugfahrten während eines Jahres wird die jährliche Traktionsenergie für die Abwicklung des gesamten Betriebsprogramm in einem Tunnel ermittelt.

²² Folgende Höchstgeschwindigkeiten werden verwendet: Giruno: 250 km/h, FV-Dosto: 200 km/h, Flirt und Kiss: 160 km/h, CEX: 120 km/h, Standard-GZ: 100 km/h.

Treibhausgasemissionen zur Erzeugung der Traktionsenergie

Die Treibhausgasemissionen, die mit der Produktion der erforderlichen Traktionsenergie verbunden sind, werden wie folgt ermittelt:

- Es wird ein Mix aus x % «Bahnstrom 2021» und $100-x$ % nachhaltig produziertem Bahnstrom angenommen. x kann im Modell angepasst werden, als Standardwert wird 0 eingesetzt (Situation eines zukünftigen Tunnels, für dessen Durchfahrt zu 100 % nachhaltig produzierter Bahnstrom eingesetzt wird, was nach Aussage der SBB für deren Netz ab 2025 der Fall sein wird).
- Die CO₂-Emissionen pro Energieeinheit können Tabelle 3 entnommen werden (Werte in kg CO₂-eq pro kWh).

5.5 Validierung des Rechenmodells

Folgende Teile des Optimierungsmodells werden im Rahmen der Validierung untersucht und hinsichtlich Plausibilität überprüft:

1. Geometrische Abmessungen der wesentlichen Tunnelelemente und - damit verbunden - erforderliche Materialmengen, welche neben Kostenfolgen auch einen Einfluss auf die Höhe der grauen Energie für deren Herstellung haben.
2. Kosten für die folgenden fünf Bauprozesse: Vortrieb, Ausbruchsicherung, Abdichtung, Innengewölbe und Materialbewirtschaftung.
3. Traktionsenergie von Tunnelfahrten, wobei aufgrund der Datenlage und der grossen Variabilität der Güterzüge hinsichtlich Zuglänge und -gewicht nur der Reisezugverkehr untersucht wurde.

Die Erkenntnisse aus den Punkten 1. und 2. haben dazu geführt, dass Teile des Modells angepasst und so die Qualität der Abschätzung der Baukosten und teilweise des Energieverbrauchs für die Bauphase verbessert werden konnte. Die Prüfung der Traktionsenergie zeigte, dass gemessene Werte stärker streuen als erwartet; eine Anpassung des Modells zur Abschätzung der Traktionsenergie hat sich jedoch nicht als notwendig bzw. zielführend erwiesen, da die gemessenen Mittelwerte in der Regel gut mit den berechneten Werten übereinstimmen.

Das Vorgehen, die verwendeten Daten sowie die Ergebnisse der Validierung sind in einem Validierungsbericht festgehalten [57].

6. Produkt 3: Excel-Tool für die Anwendung des Optimierungsmodells

Für die effiziente Anwendung des Optimierungsmodells wurde ein IT-Tool entwickelt, das in Microsoft Excel implementiert wurde. Für die korrekte Anwendung sind Grundkenntnisse im Bereich Tunnelbau erforderlich.

Für die Anwendung müssen die Eingabewerte in zwei Registerkarten (Tunnel- und Betriebsdaten) eingegeben werden. Aus diesen werden automatisch die Resultate zusammengestellt. Dazwischen werden in vielen weiteren Registerkarten Parameter zur Tunnelgeometrie, zu den Baukosten, dem Energieverbrauch (im Bau und im Betrieb) berechnet. Eine Bedienungsanleitung befindet sich im Anhang A4.

6.1 Struktur des Excel-Tools

Folgende Liste beschreibt kurz den Inhalt der Registerkarten:

- **Readme:** Bemerkungen zur Version und wichtigste Hinweise zur Datenerfassung.
- **Tunneldaten:** Eingabe der Parameter zur Tunnelgeometrie (Querschnitt, Länge etc.), zum Bau und den für die Anlieferung von Baumaterialien sowie die Entsorgung von Ausbruchmaterial anfallenden Transportdistanzen.
- **Betriebsdaten:** Eingabe der Betriebsparameter (Anzahl Züge und Geschwindigkeitsprofil für die schnellsten Reisezüge in Form einer stückweise linearen Funktion für beide Fahrtrichtungen). Die von der Komposition abhängigen Geschwindigkeitsprofile (z.B. solche für Güterzüge), werden daraus ermittelt, indem das Geschwindigkeitsprofil bei der Höchstgeschwindigkeit «abgeschnitten» wird.
- **Ergebnisse:** Zusammenzug der Ergebnisse.
- **Ergebnisvergleich:** dient der Speicherung von Ergebnissen für verschiedene Tunneldurchmesser und der Darstellung mittels Säulendiagrammen.
- **Hilftabelle Diskontierung** (standardmässig ausgeblendet): Hilfstabelle zur Ermittlung der diskontierten Kosten inklusive einer linearen Erhöhung des Strompreises.
- **Listen** (standardmässig ausgeblendet): Inhalte für alle Drop-Down Menüs.
- **Parameter:** Auflistung der wichtigsten Modellparameter (Anpassung nur durch BAV-Administrator)
- **Bau-Geometrie:** Berechnung der Querschnitte und geometrischen Abmessungen für den Bau.
- **Baukosten:** Zusammenfassung der Baukosten
- **Baukosten-MUF/-MUL/-SM/-SPV/-TBM:** Berechnung der Materialmengen und Kosten für den MUF-Vortrieb / den MUL-Vortrieb / den Schildmaschine-Vortrieb / den Sprengvortrieb / den TBM-Vortrieb.

- **Traktionsenergie:** Berechnung des Laufwiderstands im Freien, des mittleren Tunnelfaktors, des Laufwiderstands im untersuchten Tunnel sowie die pro Fahrt durch einen Tunnel und die über ein Jahr aggregierte Traktionsenergie (Annahme: Fahrt in der Ebene und ohne Kurven).
- **Energie:** Erforderliche Energieparameter für Transport, Herstellung Baustoffe und Bauprozesse.
- **Energie-Baustoffe/-Bauprozesse/-Transport:** Berechnung des Energieverbrauchs für die Produktion der Baustoffe, der Bauprozesse sowie für die Transporte.
- **Transport:** Berechnung der Transportdistanzen zur Baustelle und im Tunnel für die jeweiligen Transportmittel.

Das Register mit dem Zusammenzug der Ergebnisse hat fünf Resultatkategorien. Die erste enthält eine Aufteilung der Rohbaukosten (inkl. Energiekosten) auf die einzelnen Bauprozesse. Die Zweite beinhaltet den Energieverbrauch für die Herstellung der Baustoffe, die Bauprozesse, die Bautransporte sowie die Traktion während der gesamten Betriebsdauer. Auch die CO₂-Emissionen werden für die gleichen Kategorien angegeben. Die Kostenbilanz der Gesamtkosten bildet den Abschluss. Dort werden die Kosten der CO₂-Emissionen monetarisiert und die Baukosten sowie die Kosten der Traktionsenergie (umgerechnet auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels) angegeben. Hinzu kommen noch die genauen Baumaterialmengen in Tonnen.

Alle Ergebnisse mit Ausnahme der Baumaterialien können automatisch als Balkendiagramme in der Registerkarte «Ergebnisvergleich» dargestellt werden. Dafür müssen die Resultate für verschiedene Kombinationen von Innendurchmesser und h_{SOK} -Werte von der Registerkarte «Ergebnisse» in die Registerkarte «Ergebnisvergleich» kopiert und dort als Werte eingefügt werden.

6.1.1 Grundsätze

Für die Anwendung des Tools müssen wichtige Kenngrößen wie das Tunnelsystem (inkl. Anzahl Röhren) sowie die Länge der Bauabschnitte, die mittels einer der üblichen Vortriebsmethoden erstellt werden, bekannt sein.

Im Tool wird unterschieden zwischen tunnelspezifischen und Modellparametern. Die Modellparameter hängen nicht vom Tunnel ab (z.B. Einheitskosten von Baumaterialien, Betonzusammensetzung, etc.) und können von Anwender nicht angepasst werden.

6.1.2 Parameter zur Tunnelinfrastruktur und zum Tunnelbau

Um das Excel-Tool auf einen Tunnel anzuwenden, sind gewisse Parameter zwingend einzugeben. Diese beschreiben z.B. die Tunnelgeometrie. Nachfolgend findet sich eine vollständige Liste der zwingend einzugebenden Tunnelparameter, gegliedert nach den im Tool verwendeten Kategorien.

a) Allgemeine Angaben zum Tunnel:

- Tunnelsystem,
- Gleisachsabstand (bei Doppelspurtunnel),
- Anzahl Röhren,
- Innendurchmesser,
- h_{SOK} (Distanz Tunnelmitte bis Schienenoberkante),
- Anzahl Bauabschnitte und Angriffspunkte (Punkte, von denen aus der Ausbruch erfolgt).

b) Tunnelbau (gegliedert nach bis zu sechs Bauabschnitten):

- Vortriebmethode (inkl. Schildvariante bei SM),
- Länge Bauabschnitt,
- Sicherheitsaufwand/Ausbaukonzept,
- Dimensionen des Tunnelausbaus (z.B. Tübbingstärke),
- Abdichtungskonzept,
- Mittlere Transportdistanz im Tunnel.

c) Materialbewirtschaftung:

- Verteilung auf verschiedene Verwertungsarten

Zusätzlich zu diesen zwingenden nötigen Parametern gibt es noch weitere, welche mit einem Defaultwert hinterlegt sind. Wenn tunnelspezifische Werte eingegeben werden, so wird mit diesen gerechnet und die Genauigkeit der Ergebnisse erhöht sich in der Regel. Wird darauf verzichtet, so werden automatisch die hinterlegten Defaultwerte verwendet. Bei folgenden Parametern sind Defaultwerte hinterlegt:

- Erwartete Betriebsdauer (diese ist nur in gut begründbaren Fällen anzupassen),
- Verteilung auf die Sicherungsklassen,
- Bewehrungsgehalt der Tübbinge,
- Transportdistanzen und -mittel für den Antransport von Baumaterialien (zur Baustelle und im Tunnel) sowie Transporte im Rahmen der Materialbewirtschaftung.

Mit Ausnahme der Betriebsdauer sollen nach Möglichkeit die spezifischen Werte des jeweiligen Tunnels eingesetzt werden, wenn solche bekannt sind.

6.1.3 Parameter zum Tunnelbetrieb

Für den Tunnelbetrieb sind folgende Parameter einzugeben (keine Defaultwerte):

- Zugtyp (inkl. Untertyp bei Güterzügen),
- Zuglänge,
- Anzahl Züge pro Richtung und Tag,

— Geschwindigkeitsprofil im realen Betrieb entlang des Tunnels pro Fahrtrichtung (für den schnellsten Reisezugtyp zutreffende Geschwindigkeit).

Im Tool können die ersten drei der obigen vier Parameter für maximal zehn verschiedene Zugtypen einzeln eingegeben werden. Zum Verlauf der Zuggeschwindigkeit können pro Richtung je maximal sechs Werte eingegeben werden; die Geschwindigkeit wird zwischen den eingegebenen Stützstellen (Distanz ab Einfahrportal) linear interpoliert. Wenn für einen Zugtyp Werte im interpolierten Geschwindigkeitsprofil über der fahrzeugspezifischen Höchstgeschwindigkeit liegen, so werden für die Berechnung der Traktionsenergie letztere verwendet.

6.1.4 Übersicht Modellparameter

Zusätzlich zu den tunnelspezifischen Parametern welcher ein Anwender eingeben muss bzw. kann, gibt es zahlreiche weitere Modellparameter, die unabhängig vom zu beurteilenden Tunnel sind. Die wichtigsten Modellparameter sind:

- Bahnstrompreis, charakterisiert durch einen Anfangswert zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels und eine konstante jährliche Zuwachsrate über die gesamte Nutzungsdauer des Tunnels (wird für die Zuwachsrate 0 eingesetzt, so wird mit einem konstanten Bahnstrompreis gerechnet).
- Einheitspreise pro t Baustoff (z.B. Beton) bzw. von Einbauten (z.B. pro Anker).
- Geometrische Parameter, welche für die Ermittlung gewisser Ausmasse (Mengengerüste) erforderliche sind (z.B. Anzahl Anker pro Laufmeter).
- Fahrwiderstandparameter, insbes. Luftwiderstandsbeiwerte für die Fahrt im Freien, sowie diverse Grössen zur Ermittlung des Tunnelfaktors (z.B. mittlerer Luftdruck, Zugsquerschnittsfläche und -rauigkeit).
- Monetarisierung von Treibhausgasemissionen pro CO₂ t eq. (zu interpretieren als Zahlungsbereitschaft für die Minderung der CO₂-Emissionen).
- Diskontrate für die Umrechnung zukünftiger Kosten auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels.

Eine umfangreiche Liste mit Einheitspreisen beim Tunnelbau ist im Anhang A5.1 aufgeführt. Im Anhang A5.2 sind Kenngrössen zum Energieverbrauch beim Bau sowie für die Herstellung von Baustoffen tabelliert.

Modellparameter sind im Tool schreibgeschützt und können nur von einem Administrator beim BAV geändert werden, welcher das Passwort zur Deaktivierung des Schreibschutzes kennt.

7. Anwendung des Excel-Tools auf Beispieltunnel

Das Excel-Tool wurde auf zwei bestehende und zwei geplante Bahntunnel in der Schweiz angewendet. Es sind dies

- Brüttenertunnel (gemäss aktueller Planung),
- Ceneri-Basistunnel,
- Eppenbergtunnel und
- Zimmerberg-Basistunnel II (zwei verschiedene Planungsvarianten).

Die Eingabewerte dieser Tunnels wurden hauptsächlich von der SBB zusammengestellt. Einzig für die Betriebsdaten der sich noch in Planung befindlichen Tunnel haben die Autoren zusammen mit dem BAV Annahmen getroffen.

Für die Berechnung des optimalen Tunneldurchmessers wird wie folgt vorgegangen:

- Festlegung des Mindest-Innendurchmessers, welcher die Anforderungen gemäss den geltenden Normen erfüllt (Normalprofil, Gleisabstand bei Doppelspurtunnel, aerodynamisches Komfort- sowie Gesundheitskriterium).
- Ausgehend von diesem Mindestwert wird der Innendurchmesser in vier Schritten um jeweils 50 cm vergrössert. Zusätzlich wird das Modell auch auf einen kleineren, nicht normkonformen Durchmesser angewendet. Dieser wird bei der Interpretation der Ergebnisse nicht betrachtet und dient nur dazu zu zeigen, welche Modellwerte bei einem fiktiven Innendurchmesser resultieren, der 50 cm unter dem Mindestwert liegt.
- Mit steigendem Innendurchmesser wird auch die Höhe der Schienenoberkante (h_{SOK}) erhöht. Dies erfolgt so, dass bei gegebener Geometrie der Fahrbahnplatte sowie der Bankette (Breite, Dicke bzw. Höhe) h_{SOK} soweit maximiert wird, dass zwischen dem unteren Rand der Fahrbahnplatte und der Innenverkleidung ein (senkrechter) Mindestabstand von 30 cm verbleibt (vgl. Abbildung 10).
- Die massgeblichen Beiträge zu den Baukosten, zum Energieverbrauch und zu den CO₂-Emissionen werden in Abhängigkeit des Innendurchmessers formelbasiert mit dem Tool ermittelt und die drei Optimierungskenngrössen gemäss Kapitel 5.1 (Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten) in Abhängigkeit des Innendurchmessers visualisiert. Aus den Abbildungen kann dann aus den dargestellten Werten der optimale Innendurchmesser aus Sicht dieser drei Grössen einfach abgelesen werden.

Die Eingabeparameter ins Excel-Tool sind für die fünf analysierten Tunnel bzw. Tunnelvarianten im Anhang A7 dokumentiert.

7.1 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus Sicht der Optimierung von Gesamtkosten, Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für jeden un-

tersuchten Tunnel dargestellt. Es wurden jeweils die Modellparameter verwendet, die im jeweiligen Kapitel als Standardwerte angegeben sind (wichtigste Parameter: Stromkosten von 11.5 Rp/kWh, Monetarisierung der CO₂-Emissionen mit 210 CHF/ t CO₂-eq., Produktion Bahnstrom über gesamte Betriebsdauer aus 100 % erneuerbarer Energie, Diskontierung von Kosten während der Betriebsphase mit 2 % pro Jahr).

7.1.1 Brüttenertunnel

Tunneltyp	Einspurtunnel (2 Röhren)
Vortriebsart	23 % SM (Erddruck), 59 % SM (Mechanisch), 18 % MUF
Länge	8'610 m
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h

Tabelle 8: Wichtigste Kenngrössen Brüttenertunnel

Für den Brüttenertunnel wurde zusätzlich zum Planungswert, welcher dem minimalen F_{ae} entspricht, ein kleinerer und drei grössere Durchmesser betrachtet. Die Angaben zu den Innendurchmessern und h_{SOK} sind in Tabelle 9 aufgeführt. Beim kleinsten Durchmesser reduziert sich die Bankettbreite mangels Platz auf einen kleineren Wert als gemäss Planung vorgesehen, der aber immer noch normkonform ist. Bei den Innendurchmessern, die über dem Planungswert liegen, wurde h_{SOK} so festgelegt, dass die Bankettbreite gemäss Planung resultiert.

	Innendurchmesser [mm]	h_{SOK} [mm]
	7'800	2'300
Planung	8'300	2'312
	8'800	2'740
	9'300	3'120
	9'990	3'420

Tabelle 9: Brüttenertunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind die drei Optimierungsparameter (Gesamtkosten, Treibhausgasemissionen sowie Energieverbrauch über die Bau- und Betriebsphase) in Abhängigkeit des Innendurchmessers dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Rund zwei Drittel der Gesamtkosten entfallen auf die vom Innendurchmesser abhängigen Rohbaukosten. Die Zunahme der Rohbaukosten ist etwas stärker als die Abnahme der Traktionsenergiekosten; der Beitrag der Treibhausgasemissionen ist praktisch vernachlässigbar. Vergleicht man die Gesamtkosten für die beiden Innendurchmesser von 8.3 m (Planungswert) und 8.8 m, so zeigen sich keine signifikanten Unterschiede (bzw. diese sind kleiner als die Modellungenauigkeiten). Aus Sicht der Gesamtkosten wäre ein geringfügig höherer Innendurchmesser als der Planungswert äquivalent.

- Aus Sicht der Treibhausgasemissionen ist generell ein kleinerer Innendurchmesser vorteilhaft, da die Bauphase – und dort primär die Herstellung der Baustoffe (insbes. von Beton) – dominiert. Da für die Traktion angenommen wird, dass diese zu 100 % mit nachhaltig produziertem Strom erfolgt und folglich die CO₂-Emissionen gering sind, ist die Herstellung der Baustoffe, insbesondere von Beton, für über 75 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die beiden Innendurchmesser 8.3 und 8.8 m sind bezüglich Treibhausgasemissionen allerdings weitgehend äquivalent; bei noch grösseren Innendurchmessern übersteigen die zusätzlichen Emissionen beim Bau die Einsparungen bei der Traktion.
- Ein sehr klares Bild zeigt die Optimierung beim Energieverbrauch. Beim geplanten Innendurchmesser entfallen lediglich 6 % des Energieverbrauchs auf die Bauphase. Somit wird der Energieverbrauch primär durch die Traktion in der Betriebsphase bestimmt. Der Energieverbrauch nimmt deshalb mit steigendem Innendurchmesser signifikant ab.

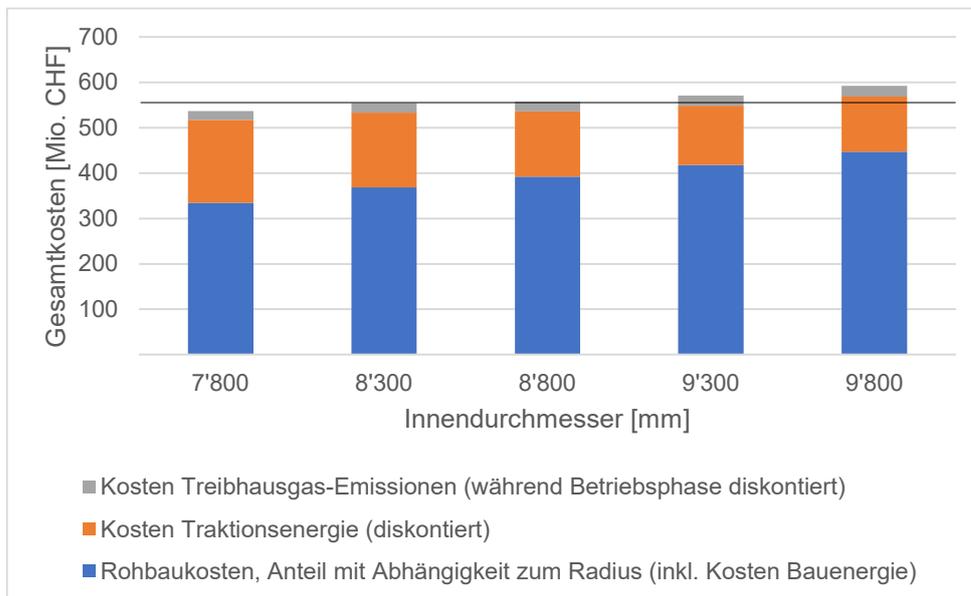


Abbildung 11: Brüttenertunnel – Gesamtkosten

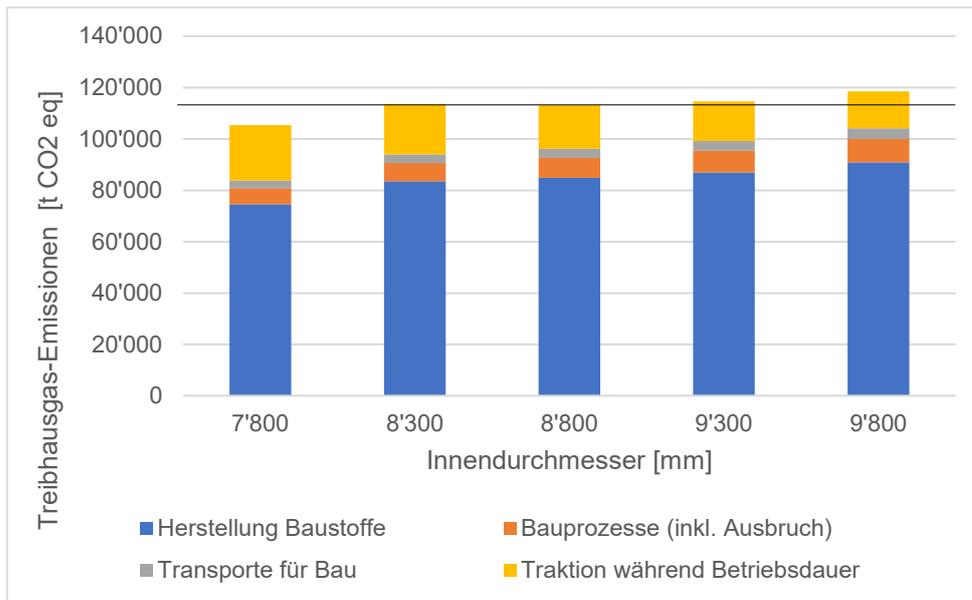


Abbildung 12: Brüttenertunnel – Treibhausgasemissionen

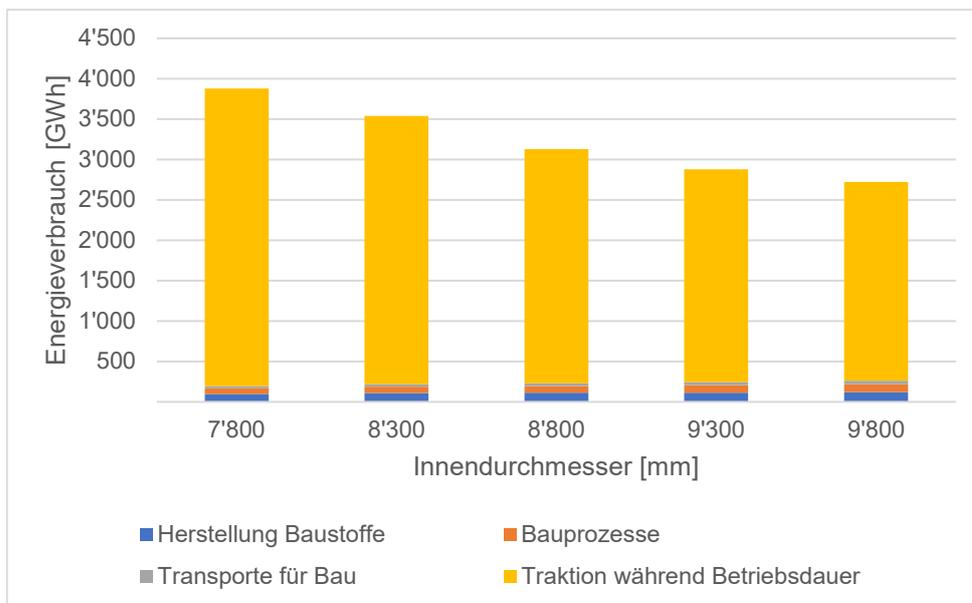


Abbildung 13: Brüttenertunnel – Energieverbrauch

7.1.2 Ceneri-Basistunnel

Tunneltyp	Einspurtunnel (2 Röhren)
Vortriebsart	100 % SPV
Länge	15'461 m
Höchstgeschwindigkeit	200 km/h

Tabelle 10: Wichtigste Kenngrössen Ceneri-Basistunnel

Da der Ceneri-Basistunnel ein Hufeisenprofil aufweist, kann er streng genommen mit dem vorliegenden Modell, das auf einem Kreisprofil beruht, nicht sauber abgebildet werden. Das zum Hufeisenprofil äquivalente Kreisprofil wird so gewählt, dass F_{ae} für die beiden Profile übereinstimmt. So resultiert ein minimaler Innendurchmesser von 8.1 m. Der ebenfalls betrachtete Wert von 7.6 m stellt einen theoretischen Vergleichswert dar, der nicht normkonform ist. h_{SOK} wurde jeweils so gewählt, dass die immer gleiche Bankettgrösse resultiert.

	Innendurchmesser [mm]	h_{SOK} [mm]
	7'600	2'200
Min F_{ae}	8'100	2'485
	8'600	2'750
	9'100	3'020
	9'600	3'290

Tabelle 11: Ceneri-Basistunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind die drei Optimierungsparameter in Abhängigkeit des Innendurchmessers dargestellt. Aus Sicht der Gesamtkosten und der Treibhausgasemissionen ist der kleinste noch normkonforme Innendurchmesser optimal; dieser wurde – als Hufeisenprofil - auch umgesetzt. Einzig aus Sicht des Energieverbrauchs, der primär durch die Traktionsenergie bestimmt ist, ist der grösste Innendurchmesser optimal.

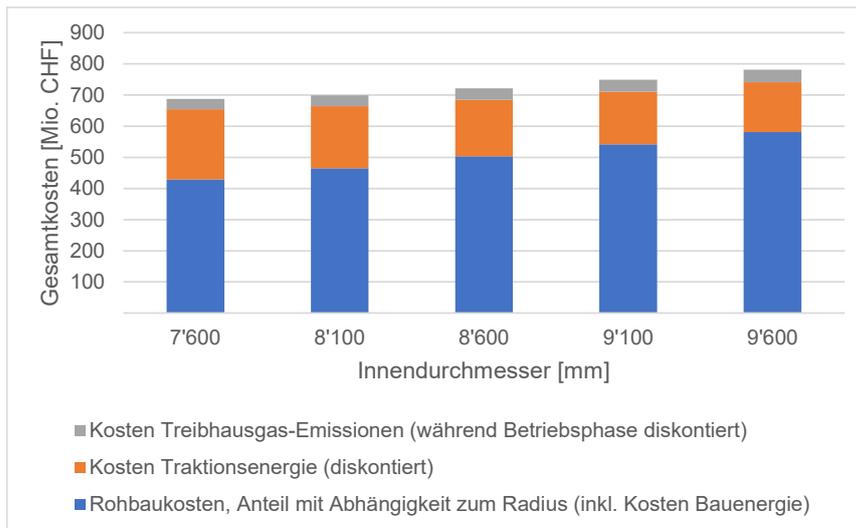


Abbildung 14: Ceneri-Basistunnel – Gesamtkosten

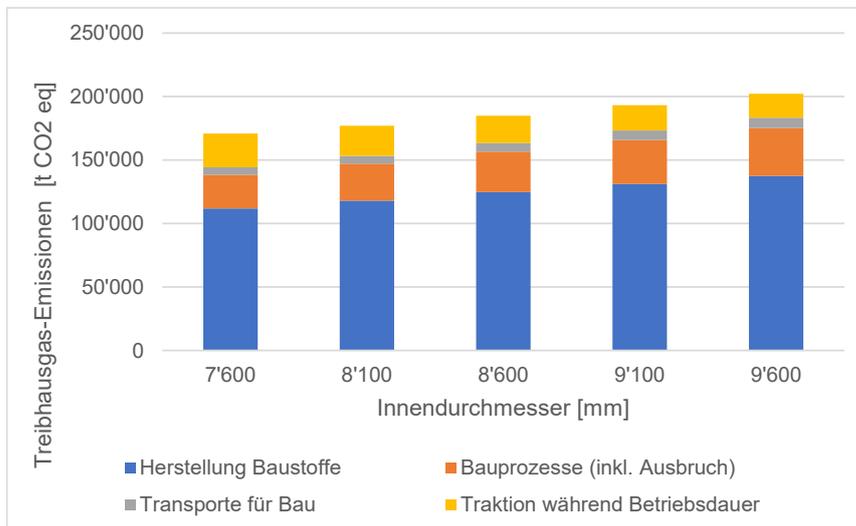


Abbildung 15: Ceneri-Basistunnel – Treibhausgasemissionen

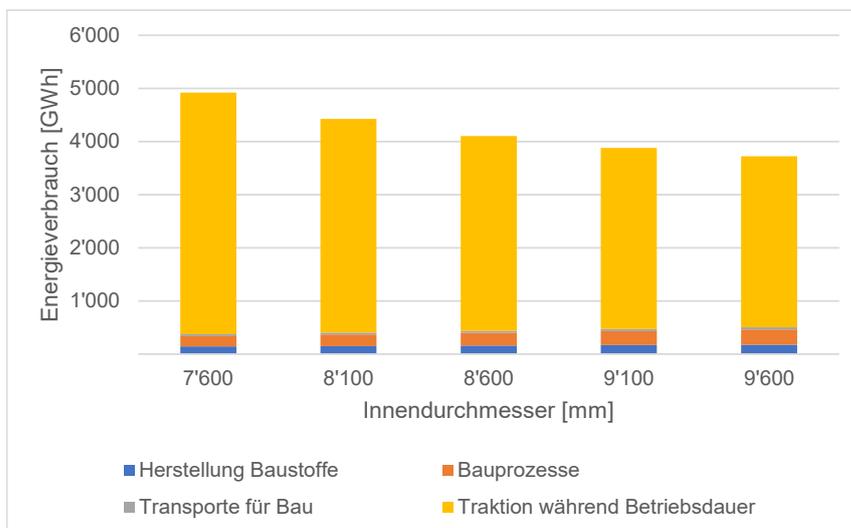


Abbildung 16: Ceneri-Basistunnel – Energieverbrauch

7.1.3 Eppenbergtunnel

Tunneltyp	Doppelspurtunnel (1 Röhre)
Vortriebsart	70 % SM (Mechanisch), 30 % SM (Hydro)
Länge	2'575 m
Höchstgeschwindigkeit	160 km/h

Tabelle 12: Wichtigste Kenngrössen Eppenbergtunnel

Unter den untersuchten Fallbeispielen ist der Eppenbergtunnel der einzige Doppelspurtunnel. Realisiert wurde der geringste noch normkonforme Innendurchmesser von 11.15 m; der betrachtete kleinere Wert stellt deshalb ein fiktives Beispiel dar, welches nur für Vergleichszwecke betrachtet wird.

	Innendurchmesser [mm]	h_{SOK} [mm]
	10'650	2'180
realisiert	11'150	2'250
	11'650	2'810
	12'150	3'300
	12'650	4'000

Tabelle 13: Eppenbergtunnel – Innendurchmesser und h_{SOK}

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind die drei Optimierungsparameter in Abhängigkeit des Innendurchmessers dargestellt. Gegenüber den zwei-röhrigen Tunneln mit Richtungsverkehr zeigen sich mit Ausnahme des Energieverbrauchs, welcher mit dem Innendurchmesser auch hier abnimmt, Unterschiede:

- Die Zunahme der Gesamtkosten mit dem Innendurchmesser ist wenig ausgeprägt und liegt unter der Modellgenauigkeit. Aus Sicht der Gesamtkosten hätte somit auch ein grösserer Innendurchmesser gewählt werden können.
- Die Treibhausgasemissionen nehmen mit steigendem Innendurchmesser tendenziell ab, wenn auch nur in geringem Masse. Dies ist primär die Folge der Reduktion der erforderlichen Baustoffmengen (primär Beton): Durch die Vergrösserung des Durchmessers und der damit verbundenen Erhöhung von h_{SOK} reduziert sich nämlich die erforderliche Betonmenge in der Sohle.

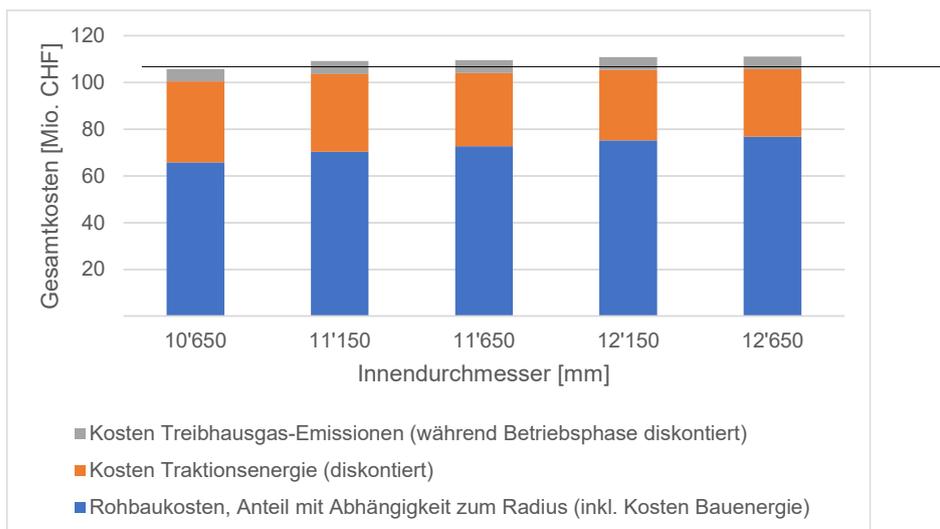


Abbildung 17: Eppenbergtunnel – Gesamtkosten

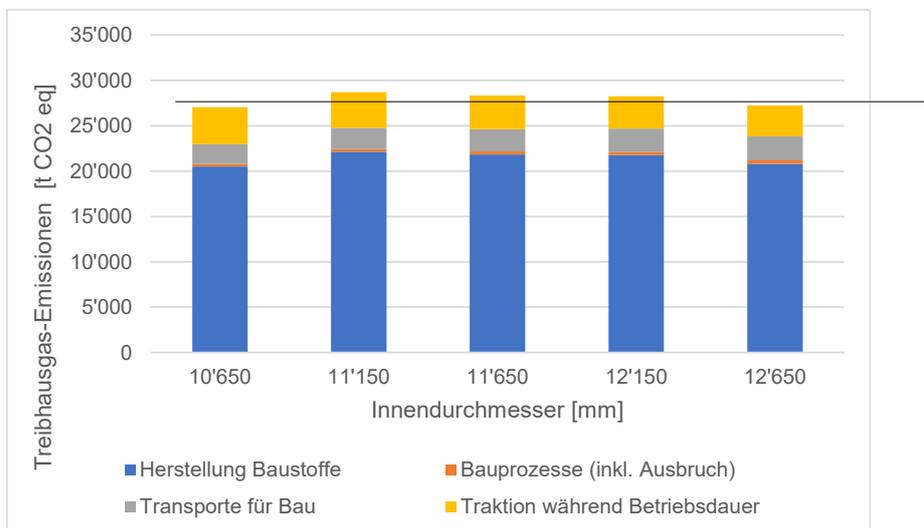


Abbildung 18: Eppenbergtunnel – Treibhausgasemissionen

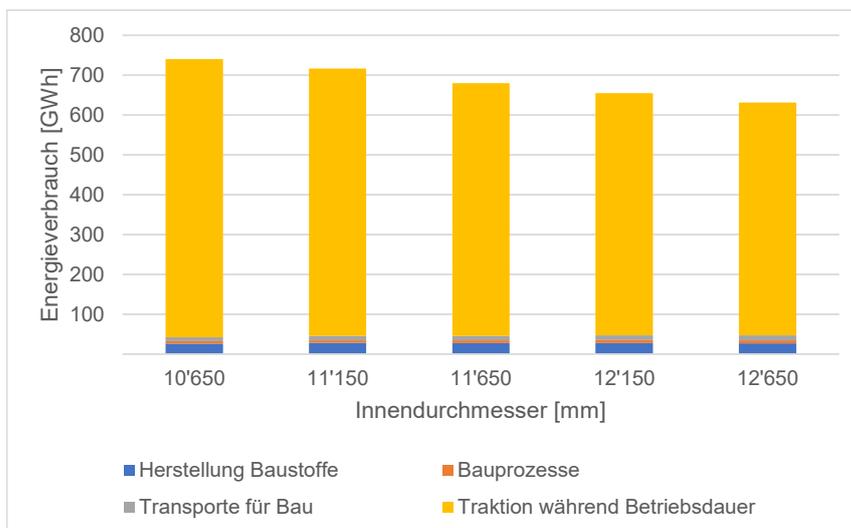


Abbildung 19: Eppenbergtunnel – Energieverbrauch

7.1.4 Zimmerberg-Basistunnel II

Tunneltyp	Einspurtunnel (2 Röhren)
Vortriebsart	85 % SM (mechanisch), 15 % SPV

Tabelle 14: Wichtigste allgemeine Kenngrössen ZBT II

Der Zimmerberg-Basistunnel II (ZBT II) ist derzeit in Planung. Verschiedene Varianten, die sich in der Linienführung (und damit der Tunnellänge), der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sowie dem geplanten Innendurchmesser unterscheiden, wurden untersucht. Im Vordergrund steht Variante 3 (V3) mit der kürzesten Streckenführung, dem kleinsten geplanten Tunneldurchmesser und einer Betriebsgeschwindigkeit von maximal 160 km/h. Variante 1 und die Variante KS weisen die gleiche Linienführung und jeweils eine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h auf. Sie unterscheiden sich nur durch den Innendurchmesser bzw. h_{SOK} . Diese zwei Faktoren wurden in einem Fallbeispiel zusammengefasst, für das die Parameter aus Variante 1 zugrunde gelegt werden. Tabelle 15 zeigt die unterschiedlichen Parameter.

Variante	Tunnellänge [km]	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Innendurchmesser [mm]
1	12.4	200	8'990
KS	12.4	200	9'800
3	10.7	160	8'990

Tabelle 15: Varianten des ZBT II (Tunnellänge, zulässige Höchstgeschwindigkeit für Reisezüge und geplanter Innendurchmesser). Betrachtet werden hier die Varianten 1 und 3.

a) Variante 1

	Innendurchmesser [mm]	h_{SOK} [mm]
	7'990	2'200
	8'490	2'335
Planung V1	8'990	2'765
	9'490	3'155
	9'990	3'420

Tabelle 16: ZBT II: Variante 1 – Innendurchmesser und h_{SOK} . Die Variante KS entspricht in etwa der Variante mit dem grössten Innendurchmesser 9.99 m.

Für den kleinsten Durchmesser von 7.99 m ist die Bankettgrösse kleiner als bei den restlichen Durchmessern.

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind die drei Optimierungsparameter in Abhängigkeit des Innendurchmessers dargestellt. Die Ergebnisse zeigen ein ähnliches Bild wie beim Brüttenertunnel. Die Gesamtkosten nehmen mit dem Innendurchmesser zu, wenn auch nur relativ geringfügig (sie sind für der beiden Durchmesser von rund 8.49 m und 8.99 m praktisch identisch). Auch die Treibhausgasemissionen nehmen mit steigendem Innendurchmesser tendenziell zu.

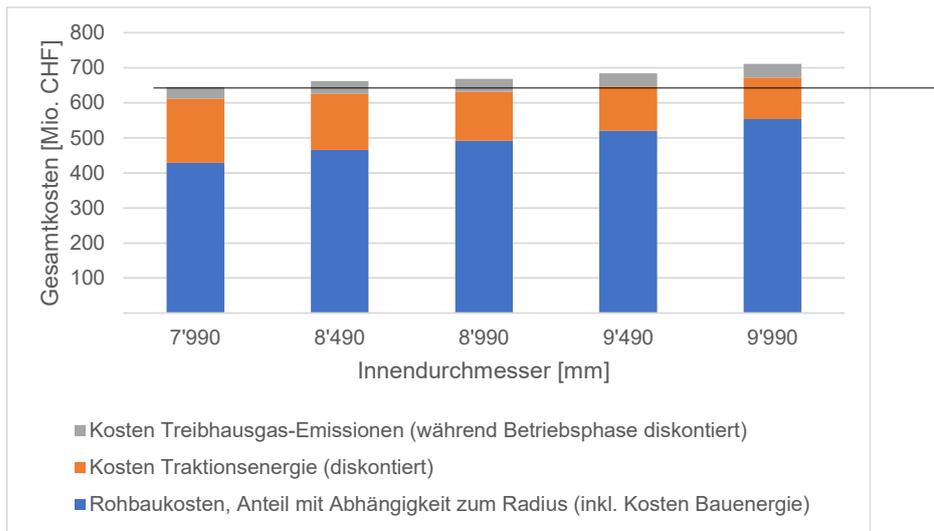


Abbildung 20: ZBT II: Variante 1 – Gesamtkosten

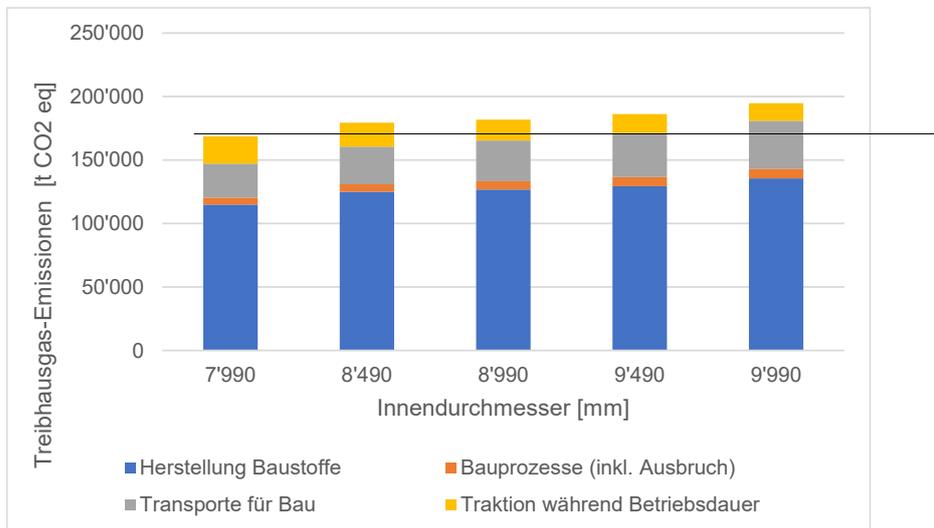


Abbildung 21: ZBT II: Variante 1 – Treibhausgasemissionen

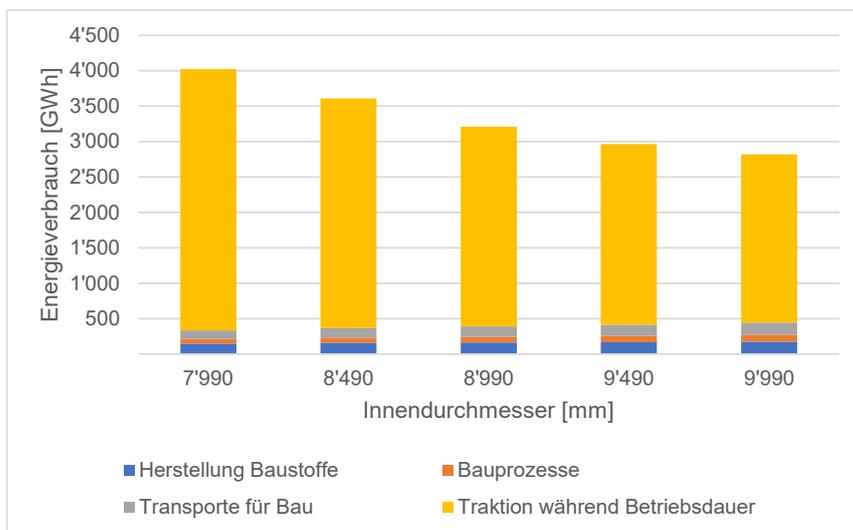


Abbildung 22: ZBT II: Variante 1 – Energieverbrauch

b) Variante 3

Für die zwei kleinsten betrachteten Innendurchmesser resultiert eine kleinere Bankettbreite als im Planungsfall (h_{SOK} lässt sich aufgrund der geometrischen Randbedingungen nicht so anpassen, dass der Planwert resultiert).

	Innendurchmesser [mm]	h_{SOK} [mm]
	7'990	2'475
	8'490	2'860
Planung V3	8'990	3'150
	9'490	3'400
	9'990	3'510

Tabelle 17: ZBT II: Variante 3 – Innendurchmesser und h_{SOK}

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind die drei Optimierungsparameter in Abhängigkeit des Innendurchmessers für die Variante 3 des ZBT II dargestellt. Die Resultate zeigen ein vergleichbares Bild wie bei der Variante 1. Die Zunahme der Gesamtkosten sowie der Treibhausgasemissionen mit steigendem Innendurchmesser ist dabei ausgeprägter als bei der Variante 1.

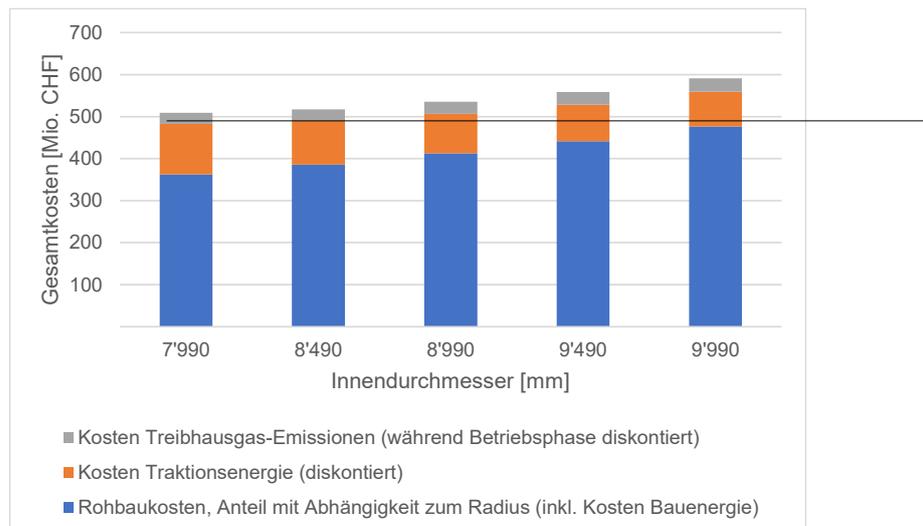


Abbildung 23: ZBT II: Variante 3 – Gesamtkosten

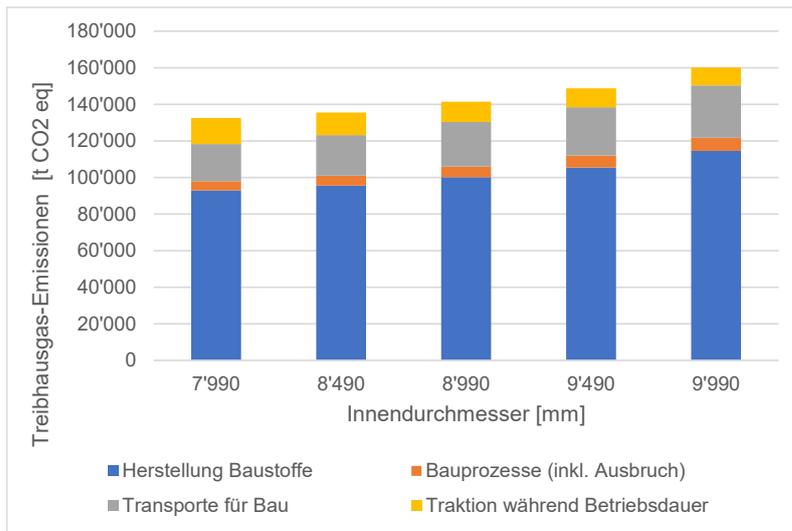


Abbildung 24: ZBT II: Variante 3 – Treibhausgasemissionen

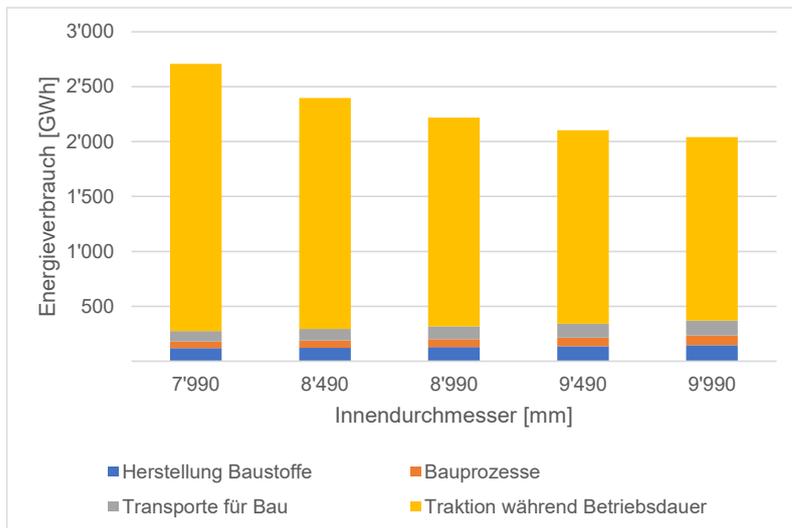


Abbildung 25: ZBT II: Variante 3 – Energieverbrauch

8. Sensitivitätsanalysen und Folgerungen für weitere Tunnel

8.1 Vorgehen und Ergebnisse Sensitivitätsanalysen

Für alle in Kapitel 7 betrachteten Fallbeispiele nimmt der Energieverbrauch mit steigendem Innendurchmesser ab. Wegen der klaren Dominanz der Traktionsenergie im Betrieb im Vergleich zum Energieverbrauch beim Bau (auch unter Einbezug der grauen Energie der Baumaterialien), dürfte dieses Ergebnis unabhängig von den spezifischen Tunnelmerkmalen sowie vom zugrunde gelegten Betriebsprogramm praktisch immer zutreffen.

Weniger eindeutig ist die Optimierung nach Gesamtkosten sowie Treibhausgasemissionen. Die untersuchten Fallbeispiele zeigen, dass in der Regel der kleinste, noch normkonforme Innendurchmesser optimal ist. Am Beispiel des Eppenbergtunnels ist jedoch erkennbar, dass die Gesamtkosten in bestimmten Wertebereichen des Innendurchmessers nicht signifikant mit diesem zunehmen und dass die Treibhausgasemissionen sogar mit steigendem Innendurchmesser abnehmen können.

Nun stellt sich die Frage, wie weit die obigen Ergebnisse für die untersuchten Fallbeispiele von den gewählten Modellannahmen abhängig sind. Oder anders gefragt: Wie müssten wichtige Modellparameter²³ angepasst werden, damit zumindest für einzelne der untersuchten Tunnel bzw. Tunnelvarianten ein vergrößerter Tunnelquerschnitt optimal ist? Dabei wird lediglich die Optimierung nach den Gesamtkosten betrachtet, da nur bei diesen allen wichtigen Aspekten (Baukosten, Kosten des Energieverbrauchs während der Bau- und der gesamten Betriebsphase sowie Kosten, welche die Bereitschaft zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen widerspiegeln) Rechnung getragen wird.

Im Folgenden wird mittels Sensitivitätsanalysen untersucht, wie sich eine Variation verschiedener «wichtiger» Modellparameter auf die Gesamtkosten auswirken. Im Vordergrund stehen Modellparameter, welche folgenden Kriterien abdecken:

- objektivierbare Grössen mit grossen Unsicherheiten (z.B. infolge unbekannter mittel- und langfristigen Trends),
- subjektiv gefärbte Parameter, welche einen Bewertungscharakter aufweisen und weder als objektiv «richtig» noch als «falsch» eingestuft werden können.

Folgende Modellparameter werden variiert (in Klammern angegeben ist der Standardwert, der den Fallbeispielen in Kapitel 7 zugrunde liegt):

²³ Für das vorliegende Kapitel stehen Modellparameter im Vordergrund, welche unabhängig vom einzelnen Tunnel sind (d.h. keine Eingabewerte für die Bewertung spezifischer Tunnel). Tunnel-spezifische Parameter, welche de facto Defaultwerte darstellen und nicht je nach Tunnel unterschiedlich gewählt werden (z.B. Betriebsdauer eines Tunnels), stellen eine Ausnahme dar, da sie eher die Merkmale von Modellparametern aufweisen.

- Diskontrate (bzw. zugehöriger Abzinsungsfaktor; 2 %). Diese wird über die angenommene Lebensdauer des Tunnels als konstant angenommen.
- Betriebsdauer des Tunnels (100 Jahre).
- mittlere, als zeitlich konstant angenommene Kosten des Bahnstroms über die gesamte Betriebsdauer (CHF 0.115 pro kWh, vor Diskontierung).

Die obigen Modellparameter werden jeweils als kontinuierliche Variablen betrachtet.

Neben dem Einfluss der drei obigen Modellparameter wird auch untersucht, wie sich Unsicherheiten bei den vom Innendurchmesser abhängigen Baukosten auswirken.

Die Sensitivität der Gesamtkosten hinsichtlich der obigen Modellparameter sowie der Baukosten hängt vom betrachteten Tunnel und vom zugehörigen Innendurchmesser ab. Es muss deshalb definiert werden, für welchen Tunnel bzw. welche Werte des Innendurchmessers Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Die folgenden Sensitivitätsanalysen beziehen sich auf die Variante 1 des Zimmerberg-Basistunnels. Die Wahl von letzterem lässt sich wie folgt begründen:

- Der Tunnel ist noch in Planung, so dass Erkenntnisse zu diesem Tunnel in der Praxis wertvoller sind als solche für bereits gebaute Tunnel.
- Der Tunnel weist in dieser Variante eine Entwurfsgeschwindigkeit von 200 km/h auf. Entsprechend der hohen Geschwindigkeit ist auch eher zu erwarten, dass das Ergebnis für gewisse Modellparameter «kippt», da eine Reduktion des Energieverbrauchs während der Betriebsphase umso stärker ins Gewicht fällt, je grösser die angenommene Höchstgeschwindigkeit ist.

Analog zu Kapitel 7 werden die Gesamtkosten für folgende Werte von Innendurchmesser und h_{SOK} ermittelt und dargestellt:

- Fall 1: Innendurchmesser = 8'890 mm und $h_{SOK} = 2'765$ mm (jeweils in blau, teilweise zusätzlich in grau dargestellt, Bezeichnung «Basis-QS»).
- Fall 2: Innendurchmesser = 9'890 mm und $h_{SOK} = 3'450$ mm (jeweils in hellrot, teilweise zusätzlich in grau dargestellt, Bezeichnung «vergrößerter QS»).

Alle anderen Werte für die betrachtete Variante 1 des ZBT II können dem Anhang A7.4.1 entnommen werden.

8.1.1 Diskontrate

Wird eine Diskontrate >0 gewählt, so werden im Betrieb anfallende Kosten für die Traktionsenergie sowie die monetarisierten Treibhausgasemissionen auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels abdiskontiert. Je grösser die Diskontrate und je länger die Betriebsdauer eines Tunnels gewählt wird, desto stärker werden zukünftige Kosten abgezinst («heruntergerechnet»). Der Wahl einer positiven Diskontrate liegt der Gedanke zugrunde, dass zukünftig anfallende Kosten als weniger «gravierend» wahrgenommen werden, als wenn diese in der Gegenwart anfallen würden. Deshalb ist es üblich, diese Grössen für jedes in der Zukunft liegende Jahr um einen definierten,

positiven Prozentsatz zu diskontieren (d.h. «herunterzurechnen»). Bei über die Zeit konstanten Kosten zeigt Abbildung 26 den Zusammenhang zwischen der jährlichen Diskontrate (x-Achse) und dem über eine definierte Zeitperiode resultierenden mittleren Diskontierungsfaktor (y-Achse).

Beispiel: Bei einer Diskontrate von 2 % pro Jahr reduzieren sich die über 100 Jahre anfallenden Traktionsenergiekosten um einen mittleren Faktor von ca. 0.43. Dies bedeutet, dass die gesamthaft über 100 Jahre anfallenden Traktionsenergiekosten um diesen Faktor multipliziert werden, wenn sie mit Investitionskosten verglichen bzw. mit diesen aggregiert werden, die sich auf den Inbetriebnahmezeitpunkt des Tunnels beziehen.

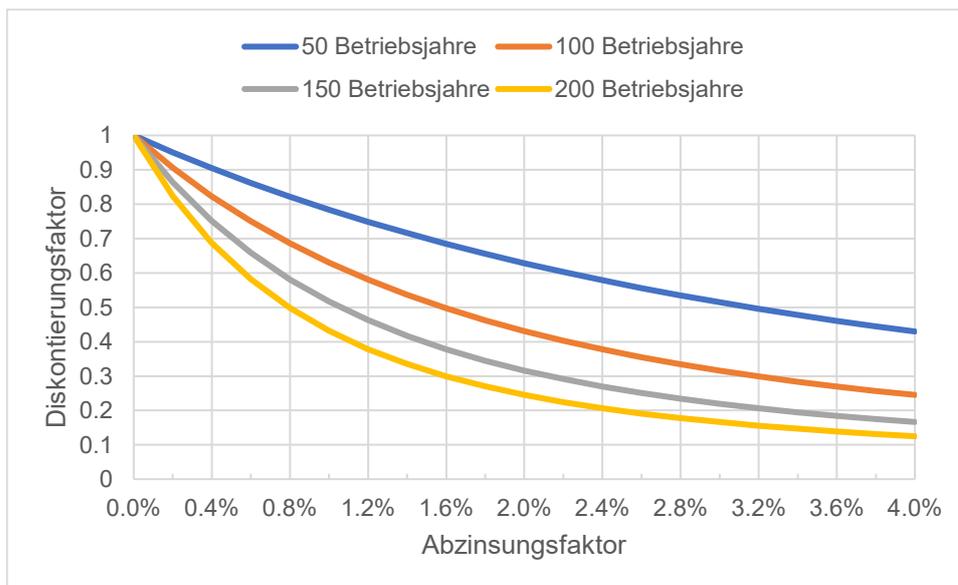


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Diskontrate/Abzinsungsfaktor und dem zeitgewichteten Diskontierungsfaktor.

Aus den nachfolgenden Abbildungen zu den Gesamtkosten sowie dem gesamten Energieverbrauch für die beiden betrachteten Tunneldurchmesser beim ZBT II (Variante 1) können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Je geringer der (jährliche) Abzinsungsfaktor, desto stärker fällt die zukünftige Einsparung von Traktionsenergie ins Gewicht (vgl. Abbildung 27 mit nach rechts auseinanderlaufenden Kurven).
- Im dargestellten Bereich weisen die Kurven aus Abbildung 27 keinen Schnittpunkt auf. D.h. die Aussage «der kleinere Tunneldurchmesser ist aus Sicht der Gesamtkosten zu bevorzugen», ist gegenüber einer Variation des jährlichen Abzinsungsfaktors stabil.

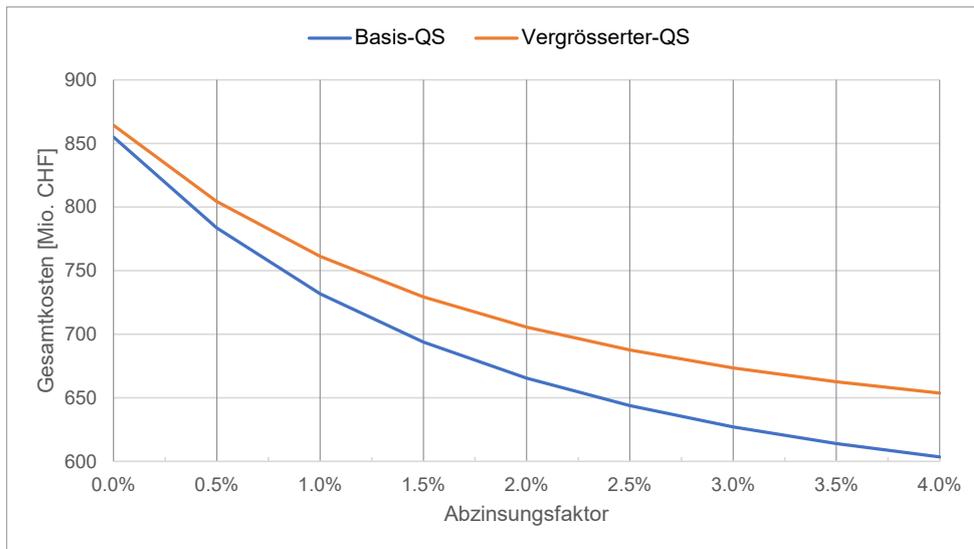


Abbildung 27: Einfluss des jährlichen Abzinsungsfaktors auf die Gesamtkosten

8.1.2 Bahnstrompreis

Abbildung 28 zeigt die Gesamtkosten in Abhängigkeit des Bahnstrompreises mit einer jährlichen Diskontrate von 2 % (Standardwert) bzw. 0 %.

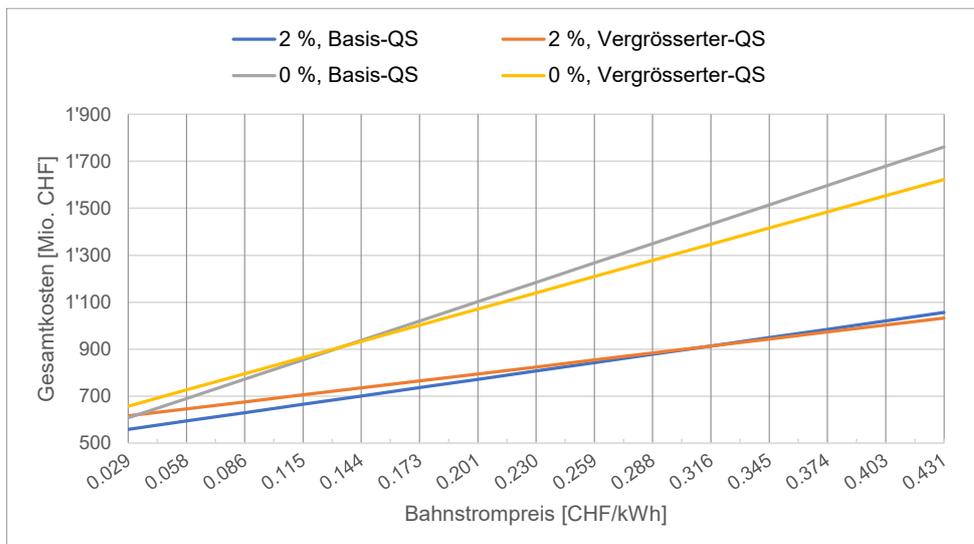


Abbildung 28: Sensitivitätsanalyse vom Bahnstrompreis – Gesamtkosten

Geringere Gesamtkosten und damit eine Präferenz für den grösseren Tunnelquerschnitt beim ZBT II (in Abbildung 28 als Schnittpunkt der entsprechenden Kurven erkennbar) ergäben sich z.B. bei einer Diskontrate von 0 % und einem mittleren Strompreis ab ca. Fr. 0.14 pro kWh, was gegenüber heute nur einer kleinen Erhöhung des Strompreises entspricht. Bei einem Abzinsungsfaktor von 2 % müsste der mittlere Strompreis hingegen den Wert von Fr. 0.32 pro kWh übersteigen, damit der grössere Tunnelquerschnitt aus Sicht Gesamtkosten vorzuziehen wäre (was gegenüber heute etwa dem dreifachen Preis entspricht). Eine Erhöhung des Strompreises kann längerfristig nicht ausgeschlossen werden und ist in Anbetracht der

potenziellen Energiemangellage in Europa wahrscheinlicher geworden als in den vergangenen Jahren.

Mit der Energiestrategie 2050 möchte der Bund nicht nur den Anteil erneuerbarer Energien mit geringen Treibhausgasemissionen erhöhen, sondern auch den Energieverbrauch senken. Im Rahmen der GrETu-Gesamtoptimierung kann dies berücksichtigt werden, indem der effektive, gesetzlich fixierte Strompreis pro kWh um einen Betrag erhöht wird, welcher der Zahlungsbereitschaft für das Einsparen einer kWh entspricht.

8.1.3 Betriebsdauer Tunnel

Die Nutzungsdauer eines Tunnels ohne eine grosse, kostspielige Erneuerung des Rohbaus (z.B. der Innenverkleidung) wird normalerweise auf 100 Jahre festgelegt. Nach Ablauf dieser Nutzungsdauer kann die Stabilität des Tunnels auch weiterhin gewährleistet sein (d.h. geringe Einsturzrisiken). Es ist davon auszugehen, dass moderne Stahlbetontunnel über 100 Jahre ohne umfassende Erneuerungsarbeiten gebrauchstauglich sind. Umgekehrt können unter ungünstigen Umständen bereits vorher umfassende Erneuerungsarbeiten am Rohbau notwendig werden.

Abbildung 29 zeigt die Gesamtkosten für beide Varianten des ZBT II in Abhängigkeit von dessen Betriebsdauer für die beiden Diskontraten 2 % und 0 %. Die Abbildung zeigt, dass der Einfluss der Lebensdauer mit Diskontierung gering ist (kein Schnittpunkt zwischen korrespondierenden Kurvenpaaren in diesem Bereich). Mit der Diskontrate von 0 % ist bei einer Nutzungsdauer ab knapp 120 Jahren der grössere Tunneldurchmesser vorzuziehen. Mit einer Diskontierung von 2 % ergibt sich nie ein Schnittpunkt, da Kosteneinsparungen in ferner Zukunft auf heute umgerechnet praktisch nicht ins Gewicht fallen. Beim Energieverbrauch ist ersichtlich, dass Einsparungen bei der Traktionsenergie umso stärker ins Gewicht fallen, je länger der Tunnel betrieben wird (vgl. Abbildung 30).

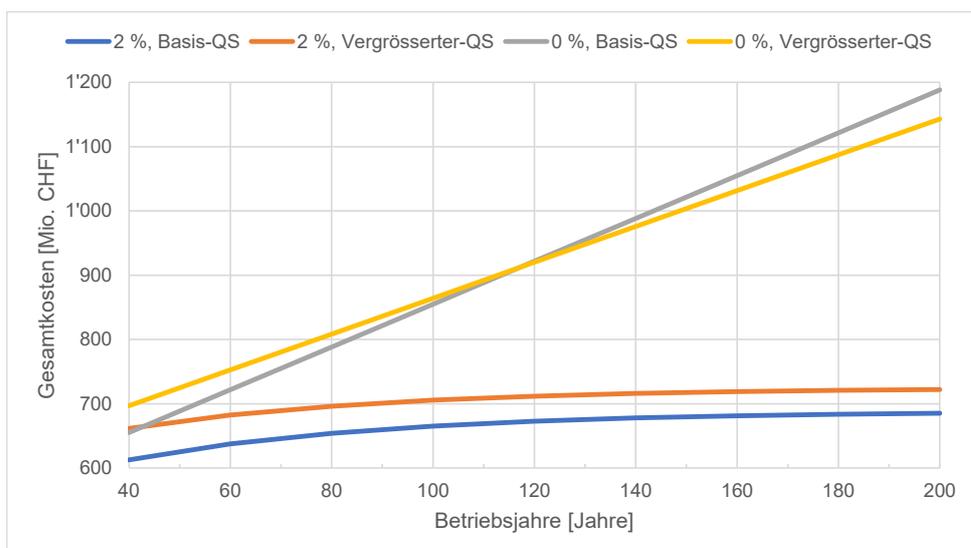


Abbildung 29: Sensitivitätsanalyse der Betriebsjahre – Gesamtkosten

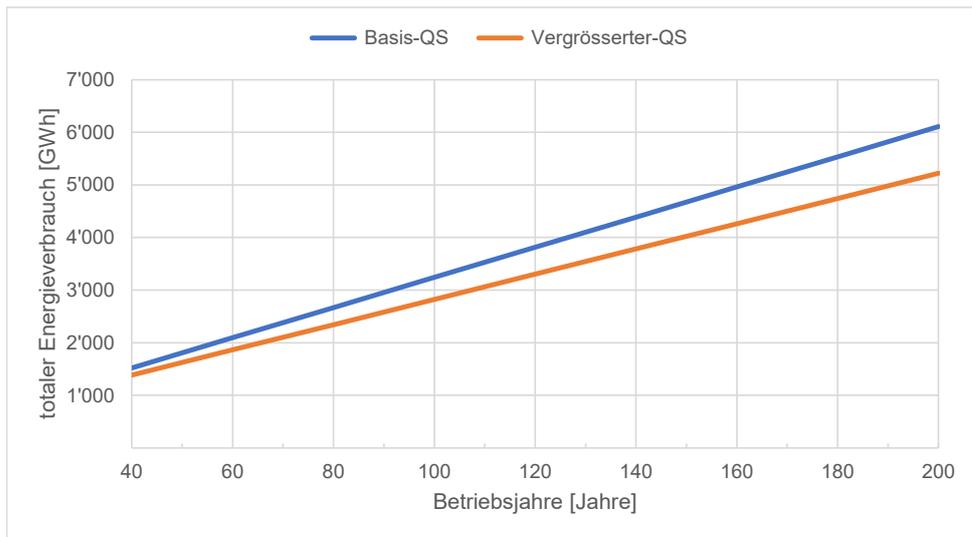


Abbildung 30: Sensitivitätsanalyse der Betriebsjahre – Energieverbrauch

8.1.4 Baukosten

Baukosten von verschiedenen Tunnels können sehr stark variieren aufgrund von lokalen Unterschieden bzw. Randbedingungen. Die Sensitivitätsanalyse der Baukosten vom ZBT II zeigt, dass auch mit den Unschärfen von plus minus 50 % sich das Resultat mit einer Diskontierung von 2 % nicht ändert. Nur bei einem Verzicht auf eine Diskontierung würde sich eine Minderung der vom Innendurchmesser abhängigen Baukosten um etwa 15 % auf die Ergebnisse auswirken (vgl. Abbildung 31).

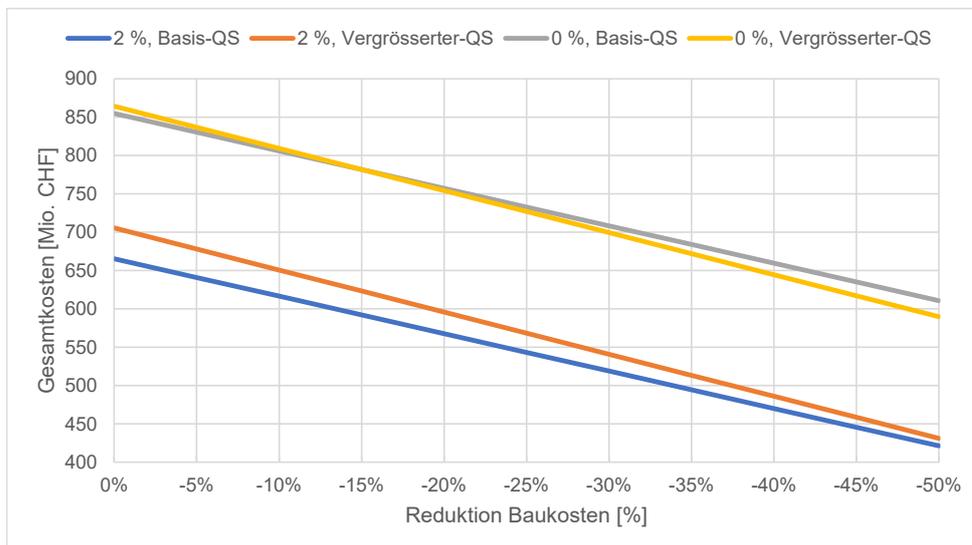


Abbildung 31: Sensitivitätskosten der Baukosten – Gesamtkosten

Aufgrund der obigen Sensitivitätsanalysen zeigt sich, dass für die Optimierung nach den Gesamtkosten die Diskontrate besonders wichtig ist. Für die Kosten/Nutzen-Bewertung von Bahnprojekten, z.B. im Rahmen des «strategischen Entwicklungsprogramms (STEP) Eisenbahninfrastruktur», ist es üblich, eine positive Diskontrate von derzeit 2 % zu verwenden. Es ist deshalb schwer begründbar, wieso für die Bewertung von Tunnel darauf verzichtet

werden soll. Für das folgende Kapitel wird deshalb davon ausgegangen, dass eine Diskontrate von 2 % verwendet wird.

8.2 Verallgemeinerung auf weitere Tunnel

In Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch ist in praktisch allen Fällen einem grösseren Tunnelquerschnitt der Vorzug zu geben. Die Ergebnisse aus dem GrETu-Modell sind hier hinreichend eindeutig, um eine solch allgemeine Aussagen machen zu können.

Bezüglich der Gesamtkosten sowie den Treibhausgasemissionen sind die Ergebnisse weniger eindeutig. Letztlich muss das Modell im Einzelfall angewendet werden, um belastbare Aussagen zu machen. Allgemeine Aussagen über verschiedenste Tunnel sowie Betriebsprogramme mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten lassen sich nur schwer machen und es besteht die Gefahr, dass solch allgemeine Aussagen in spezifischen Fällen nicht korrekt sind.

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die für die Entscheidungsfindung hinsichtlich des Innendurchmessers wichtigste Optimierung nach den Gesamtkosten:

- Je tiefer die gefahrene Geschwindigkeit, desto eher ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser optimal. Dies ist eine Folge der quadratischen Abhängigkeit der Traktionsenergie von der effektiv gefahrenen Zuggeschwindigkeit. Bei Geschwindigkeiten bis 120 km/h sowie wenn der Anteil der Zugkilometer im höheren Geschwindigkeitsbereich nur klein ist, dürften höhere Innendurchmesser in der Regel nicht gerechtfertigt sein.
- Bei eingleisigen Tunnelröhren ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser eher optimal als bei Doppelspurröhren. Dies liegt daran, dass speziell bei Doppelspurröhren ein erhöhter Innendurchmesser den Vorteil hat, dass aus geometrischen Gründen weniger Beton im Bereich der Sohle erforderlich ist, um auf Höhe der Gleise die für die normkonforme Ausgestaltung der Bankette erforderliche Breite zu erreichen.
- Solange bei Einspurtunnel mit hohen Geschwindigkeiten (160 bis 200 km/h) lediglich der heute gültige Strompreis von 11.5 Rp/kWh zugrunde gelegt wird, ist der kleinste normkonforme Innendurchmesser in der Regel der optimale.
- Bei Strompreisen über 11.5 Rp/kWh steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein erhöhter Innendurchmesser vorzuziehen ist; dies gilt insbesondere für Doppelspurtunnel.
- Für stark belastete Tunnel im hohen Geschwindigkeitsbereich (d.h. oberhalb von 200 km/h) ist auf jeden Fall eine Einzelfallbetrachtung erforderlich.

9. Projektwürdigung und Empfehlungen

9.1 Erreichter Stand und Projektwürdigung

Im Rahmen des Projekts GrETu wurde ein umfassendes Modell entwickelt, um für spezifische Tunnel mit kreisförmigem Querschnitt belastbare Entscheidungsgrundlagen zu schaffen, ob ein Innendurchmesser optimal ist, der grösser ist als gemäss den geltenden Normen erforderlich. Dabei werden die vom Innendurchmesser abhängigen Rohbaukosten sowie der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen während der Bau- und gesamten Betriebsphase berücksichtigt. Über die Monetarisierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen wird eine Optimierungsgrösse in Form der Gesamtkosten, diskontiert auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Tunnels, ermittelt. Unter Verwendung geeigneter Modellparameter sind die ausgewiesenen Gesamtkosten geeignet, um die Entscheidungsfindung hinsichtlich des optimalen Querschnitts massgeblich zu unterstützen. Um das komplexe Modell effizient anwenden zu können, wurde ein Excel-Tool entwickelt. Den Autoren sind kein publizierter Ansatz und erst recht kein öffentlich zugängliches Tool bekannt, bei dem die Frage des optimalen Tunnelquerschnitts in ähnlichem Tiefgang untersucht wird.

Angesichts der Komplexität der Thematik lassen sich nur schwer generische Aussagen zum optimalen Tunnelquerschnitt machen. Die Stärke der Produkte aus dem Projekt GrETu liegend deshalb weniger in allgemeingültigen Ergebnissen, sondern in der Möglichkeit, während des Planungsprozesses ein belastbares Modell für die Entscheidungsfindung bzgl. Des optimalen Tunnelquerschnitts einsetzen zu können

9.2 Empfehlungen zur Anwendung des Modells und Vertiefungen ausserhalb des Projekts GrETu

Um das im Rahmen des Projekts GrETu entwickelte Optimierungsmodell einheitlich und zukunftsgerichtet anwenden zu können, wird empfohlen, folgende wichtigen Modellparameter nochmals zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen:

- Strompreis: Der verwendete Wert von 11.5 Rp/kWh erscheint aus heutiger Sicht als tief, vor allem als Mittelwert über eine Betriebszeit von rund 100 Jahren. Neben einem höheren Ausgangspreis, der den heutigen Marktbedingungen besser Rechnung trägt, sollte eine lineare Preissteigerung im Umfang von mindestens der Diskontrate eingesetzt werden. Damit wird berücksichtigt, dass der Preis von Strom als zunehmend knappem Gut zukünftig eher ansteigen als konstant bleiben wird.
- Die Energiestrategie des Bundes verfolgt unter anderem auch das klare Ziel, den Energieverbrauch zu reduzieren. Dies kann im Modell berücksichtigt werden, indem der Strompreis künstlich um einen definierten Betrag pro kWh erhöht wird, welcher die Zahlungsbereitschaft zur Reduktion des Energieverbrauchs um 1 kWh beschreibt. Bei den im vorliegenden Bericht betrachteten Fallbeispielen wurde von dieser Möglichkeit nicht Gebrauch gemacht.

- Bei den Treibhausgasemissionen während der Betriebsphase könnte man sich auch auf den Standpunkt stellen, einen durchschnittlichen zukünftigen Strommix anzunehmen, statt von Strom auszugehen, der zu 100 % aus nachhaltigen Quellen produziert wird. Damit würde die etwas künstliche Unterteilung des Strommarkts in einen Bereich mit vollständig nachhaltig produziertem Bahnstrom und einem restlichen Bereich aufgeweicht.
- Weitere wichtige Parameter betreffen die Diskontrate sowie der Ansatz, mit dem Treibhausgasemissionen monetarisiert werden. Im Gegensatz zu den obigen Punkten sehen die Autoren des vorliegenden Berichts hier allerdings weniger Gründe für eine Anpassung der verwendeten Werte (2 % bzw. 210 CHF/ t CO₂-eq).

9.3 Mögliche Vertiefungen ausserhalb des Projekts GrETu

Angesichts der Komplexität der in GrETu behandelten Fragestellung mussten zahlreiche Vereinfachungen getroffen werden (vgl. Tabelle 1). Durch eine Erweiterung des in GrETu entwickelten Modells könnte auf einzelne Vereinfachungen verzichtet und ein entsprechend differenzierteres Modell entwickelt werden. Die Komplexität liegt dabei vor allem in der Modellentwicklung; dessen Anwendung müsste dabei nicht komplizierter sein.

Folgende Aspekte könnten zwecks Klärung ihres Stellenwerts für die Entscheidungsfindung zum optimalen Tunnelquerschnitt nach Abschluss des Projekts GrETu vertieft untersucht und bei Bedarf ins Modell aufgenommen werden:

- Kosten von aerodynamisch bedingten Störungen an der Fahrleitung bzw. an Pantographen sowie der durch ungünstige Strömungsverhältnisse verursachten zusätzlichen Abnutzung an diesen Systemen. Durch Vergleich mit Tunnel, die dank tieferer Geschwindigkeit oder höherem Querschnitt aerodynamisch günstiger sind, könnte die Häufigkeit von Störungen, deren Kosten (inkl. indirekte Kosten von Zugverspätungen und ggf. -ausfällen) sowie die Kosten einer kürzeren Lebensdauer von technischen Komponenten abgeschätzt werden. Ziel sollte es sein, für relevante Tunnel einen Erwartungswert für die jährlichen Folgekosten abzuschätzen.
- Sollten Lärmimmissionen und Druckstösse in Reisezügen bei einzelnen Tunneln aufgrund zu kleiner Querschnitte so gross sein, dass nachweislich zusätzliche Kosten für Massnahmen an bestehendem Rollmaterial oder bei der Bestellung von neuen Rollmaterial in Kauf genommen werden müssen, so müssten diese Mehrkosten ebenfalls berücksichtigt werden.
- Nutzen verbreiteter, mit Spezialfahrzeugen befahrbarer Bankette für die raschere Durchführung von Unterhaltsarbeiten und die Verkürzung notwendiger Tunnelsperrungen (bzw. die Nutzung von Zeitfenstern ohne Zugfahrten). Wichtige Aspekte, die ggf. tunnelspezifisch zu berücksichtigen sind, sind die Häufigkeit von Unterhaltsarbeiten, deren Dauer mit bzw. ohne Möglichkeit, Bankette zu befahren, sowie die Kosten der dafür notwendigen Tunnelsperrungen (bzw. der Zahlungsbereitschaft, letztere zu vermeiden bzw. zu minimieren).

- Berücksichtigung weiterer Tunnelprofile, statt der Beschränkung auf kreisförmige (Einbezug Hufeisenprofil für Tunnel, die nicht mit einer TBM ausgebrochen werden).
- Wenn davon auszugehen ist, dass die Lebensdauer eines Tunnels durch eine geeignete Sanierung von Rohbauelementen wesentlich verlängert werden kann, so könnten die Kosten einer solchen Rohbausanierung zusammen mit der damit verbundenen Verlängerung der Betriebsdauer berücksichtigt werden.

A1 Grundlagen und Literatur

Allgemeine Grundlagen

- [1] SIA 197/1 Projektierung Tunnel – Bahntunnel
- [2] UIC-Merkblatt 779-11 «Bemessung des Tunnelquerschnitts unter Berücksichtigung der aerodynamischen Effekte»
- [3] Unterlagen zur Energiestrategie 2050 des Bundes ([Link](#))
- [4] SIA 198:2004: Untertagebau – Ausführung
- [5] SIA 118/198:2007: Allgemeine Bedingungen für Untertagebau
- [6] SIA 196:1998 Baulüftung im Untertagebau
- [7] SIA 199: 2015 Erfassen des Gebirges im Untertagebau
- [8] Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen Abfallverordnung [VVEA; SR 814.600]

Kosten des Tunnelbaus

- [9] Planung 2. Röhre Gotthard-Strassentunnel, Ernst Basler & Partner AG, 2017
- [10] Direktverbindung Zürich-Aarau, EBP Schweiz AG, 2020

Kosten und Energieverbrauch für die Aufbereitung und den Transport von Ausbruchmaterial

- [11] Fachgruppe für Untertagebau (FGU) : Gestion et valorisation de matériaux d'excavation – Inventaire de grands projets suisse, 2015
- [12] BFE 2001, C.U. Brunner:
Energieverbrauch im Schienenverkehr – spez. Energieverbrauch für Transportleistung Güterzüge
- [13] Umweltbundesamt Deutschland, 2020:
Endenergieverbrauch/ Energieeffizienz des Verkehrs – spez. Energieverbrauch für Transportleistung Güterzüge
- [14] Ökobilanz der Materialbewirtschaftung beim Gotthard-Basistunnel, AlpTransit Gotthard AG, 1998, Ernst Basler & Partner AG
- [15] Gotthard-Basistunnel, AlpTransit Gotthard AG:
Erfahrungswerte EBP zu Materialbilanzen, Mengen, Leistungen, Kosten (unveröffentlichte Arbeitsdokumente)
- [16] NBS Mattstetten-Rothrist, Abschnitte 2+3 (Bahn 2000):
Erfahrungswerte EBP zu Materialbilanzen, Mengen, Leistungen, Kosten (unveröffentlichte Arbeitsdokumente)

- [17] N02 Secondo tubo San Gottardo: Erfahrungswerte EBP zu Materialbilanzen, Mengen, Leistungen, Baustrombedarf (unveröffentlichte Arbeitsdokumente)
- [18] Kanton Zürich; Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft: Verwertung von Molassegestein als Baustoff oder Rohstoff, (2019 (unveröffentlichter Bericht))
- [19] Kantone GL, GR, SG, SH ZH sowie AG
Umweltrelevante Erfahrungen beim Tunnelbau mit Sprengvortrieb mit Massnahmen zur Optimierung einer umweltgerechten Entsorgung und Verwertung von Tunnelausbruchmaterial; GeoPartner AG, 8. März 2018

Energieverbrauch beim Tunnelbau

- [20] Sauer, Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur, Dissertation, 2016.
- [21] Hard Rock Tunnel Boring, Doctoral theses at NTNU Trondheim Norwegian University of Science and Technology, 1998:81
- [22] Herzog, Bohrklassifizierung für Tunnelbohrmaschinen mittels Löseenergie, Diplomarbeit, 2005.
- [23] Celada, J. M. Galera, C. Muñoz, I. Tardàguila, The use of specific drilling energy for rock mass characterization and TBM driving during tunnel construction.
- [24] Majid Mirahmadi, Morteza Tabaei & Mohsen Soleiman Dehkordi: Studying the Effect of Tunnel Depth Variation on the Specific Energy of TBM, Case Study: Karaj–Tehran (Iran) Water Conveyance Tunnel
- [25] Busslinger, A. & Portmann, D.: Baulüftung und -kühlung des Brenner-Basistunnels, Fachzeitschrift Felsbau, 2007

Aerodynamik und Ermittlung Traktionsenergie

- [26] W.J. Davis, Jr., The Tractive Resistance of Electric Locomotives and Cars, General Electric Review, October 1926, page 3.
- [27] Ulrich Linder, [Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung](#), Dissertation an der Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, TU Berlin, 2004
- [28] Markus Meyer, Eisenbahn-Systemtechnik I, ETH Zürich, 2018
- [29] Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr des Freistaats Sachsen, [Vorplanungsstudie Eisenbahn-Neubaustrecke Dresden – Prag](#), Aufgabe 3 Technische Beurteilung wesentlicher Bauwerke, Krebs und Kiefer AG, 30. Oktober 2015 (Seite 10).

- [30] Sang Yeon Seo und Heesang Ha, Effect of pressure-relief ducts on traction demand in a tunnel: a numerical evaluation, GS Engineering & Construction, Seoul, South Korea ([online-Publikation](#)).
- [31] DB Netz, Ril 853, «Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten», Fassung vom 1. September 2018.
- [32] CEN: prEN 14067-5:2018, Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel, Entwurf prEN 14067-5:2018, Mai 2019.
- [33] GAILLARD, Michel A., Dissertation „Zur Aerodynamik der Zugbegegnung im Tunnel und auf offener Strecke“, ETH Zürich, 1973.
- [34] Sockel, H.: Aerodynamics of trains, in Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery, ed. by Schetz, J.A. and Fuhs, A.E., John Wiley & Sons, New York 1996, 1721-1741.
- [35] DB AG, FTZ München, FTZ 82, Aerodynamik, Staudrücke im Tunnel, Mai 1999.
- [36] DB AG, DB Systemtechnik, TZF 102, Aerodynamik und Klimatechnik. „Staudrücke im Tunnel – Umsetzung der Messungen im Tunnel Langes Feld“ vom 11. Juli 2002.
- [37] DB Systemtechnik GmbH, TT.TVE 34(1) Aerodynamik und Klimatechnik, Tunnelrechenprogrammpaket DBTunnel.
- [38] SBB I-PJ; Projektierungsassistent – Tunnelaerodynamik (PAIngT – Tunnelaerodynamik), Verfasser: HBI Haerter AG, Version 1.11.2018.
- [39] BLS AlpTransit AG, Lötschberg-Basisstrecke – Verifikation der Fahrwiderstände auf der LBS, Bericht ECH-155.23-006, Version 1.0, Autoren: ENOTRAC.

Klima- und Umweltwirkungen

- [40] Bundesamt für Umwelt und Öbu, Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz, Umwelt-Wissen Nr. 1330, 2013.
- [41] Ecoinvent, Ecoinvent, Ecoinvent data Version 3.6. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2019.
- [42] PRé Sustainability B.V.; SimaPro, <https://simapro.com/>
- [43] Bundesamt für Umwelt, Projekte und Programme zur Emissionsverminderung im Inland, Ein Modul der Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde zur CO2-Verordnung. 6. aktualisierte Ausgabe, Umwelt Vollzug, Januar 2020.
- [44] SBB, Bahn- und Haushaltsstrom, <https://company.sbb.ch/de/sbb-als-geschaeftspartner/leistungen-evu/energie/bahn-haushaltsstrom.html>, zuletzt abgerufen am 15.01.2020.
- [45] McKinsey, Swiss Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009

- [46] Bundesamt für Umwelt, Faktenblatt «Rückverteilung der CO₂-Abgabe: von der Einführung bis heute» 16. August 2022 ([Download-Link](#), abgerufen am 17.02.2023)).
- [47] Die Bundesregierung, CO₂-Bepreisung, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, zuletzt abgerufen am 15.01.2020.
- [48] Government Offices of Sweden, Sweden's carbon tax, Published 26 February 2018, <https://www.government.se/government-policy/taxes-and-tariffs/swedens-carbon-tax/>, zuletzt abgerufen am 15.01.2020.
- [49] CDP, Putting a price on risk: Carbon pricing in the corporate world, 2015.
- [50] Schweizerische Eidgenossenschaft, Schweizer Emissionshandelsregister, Termine und Resultate, Montag, 18. Januar 2021, <https://www.emissionsregistry.admin.ch/crweb/public/welcome.action;jsessionid=X545jdPyx4bYh1Qb-KmnQRZT5dlzJLGYC4wIF446.s021000106942a?token=>, zuletzt abgerufen am 18.01.2021.
- [51] Finanzen.ch, CO₂ European Emission Allowances-Preis, [CO₂ European Emission Allowances-preis | CO₂ European Emission Allowances Kurs | finanzen.ch](#), zuletzt abgerufen am 15.01.2021.
- [52] Bundesamt für Umwelt, Langfristige Klimastrategie 2050, Letzte Änderung 24.12.2020, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html>, zuletzt abgerufen am 15.01.2021.
- [53] Bundesgesetz über die Verminderung von Treibhausgasemissionen (CO₂-Gesetz) vom 25. September 2020, Art. 34, Abs. 2 ([Link](#)).
- [54] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

GrETu-Berichte und Validierung Rechenmodell

- [55] Bundesamt für Verkehr: Zwischenbericht zur Phase 1 im Projekt «Graue Energie Bahntunnel», 8. Februar 2021, Autoren: EBP
- [56] Bundesamt für Verkehr: Zwischenbericht zur Phase 2 im Projekt «Graue Energie Bahntunnel», 30. September 2021, Autoren: EBP
- [57] Optimierung des Energieverbrauchs, der Kosten sowie der Klimawirkung beim Bau und Betrieb von Bahntunnel, Schlussbericht Validierung «Graue Energie Bahntunnel» (GrETu), 1.4.2023, BAV

A2 Zusammensetzung der beteiligten Gremien

In der nachfolgenden Tabelle sind die in den drei Gremien «Fachaus-schuss», «Projektausschuss» und «Begleitgruppe» (Rollen vgl. Kapitel 2.3) vertretenen Personen aufgelistet.

Gremium	Institution	Vorname, Name	Fachgebiet / Rolle
Begleit-gruppe	SBB Infrastruktur	Dr. Federica Sandrone	Fachexpertin Tunnel
		Matthias Tuchschmid	Programmleiter Energiesparen und erneuerbare Energien
		Oliver Johner	Leiter Anforderungen Netzentwicklung
	ETH Zürich	Prof. Dr. Bryan Adey	Institut Bau- und Infrastrukturmanagement
		Prof. Dr. Guillaume Habert	Institut Bau- und Infrastrukturmanagement
	HBI Haerter AG	Dr. Peter Reinke	Spezialist Aerodynamik
	ENOTRAC AG	René Schär	Fachunterstützung Energie und Bahnstrom
	ÖBB Infrastruktur	Dietmar Zierl	Fachexperte Tunnel
Fachaus-schuss	BAV	Christoph Schneider	Sicherheit Projektleiter GrETu
		Urs Brotschi	Planung Stv. Projektleiter GrETu
		Benedikt Beer	Grossprojekte
		Andrea Casarico	Fahrzeuge
		Stephan Husen	Umwelt
		Marek Skupien	Bautechnik
		Hermann Willi	Elektrische Anlagen
	Federas Beratung AG	Rémy Chrétien	Stabsbüro Forschung und Innovation BAV
Projektaus-schuss	BAV	Rudolf Sperlich	Abteilungschef Sicherheit
		Markus Ammann	Sektionschef Umwelt
		Fritz Ruchti	Sektionschef Bautechnik
		Christophe Beuret	Sektionschef Grossprojekte
		Johannes Erhart	Zulassung und Regelwerke

Tabelle 18: Gremien, vertretene Institutionen und Mitglieder

A3 Glossar und Abkürzungen

A3.1 Glossar

Nachfolgend werden die wichtigsten Begriffe aufgeführt und erklärt. Einzelne Begriffe werden aus Sicht des vorliegenden Projekts definiert; eine unterschiedliche Begriffsverwendung in anderen Bereichen ist jederzeit möglich.

Angriffspunkt / Zwischenangriffspunkt

Punkt, von dem aus der Vortrieb sowie der Ausbruch erfolgt.

Bauabschnitt

Abschnitt eines Tunnels, der mit einer einheitlichen Vortriebsmethode von einem Angriffspunkt bzw. Zwischenangriffspunkt aus ausgebrochen wird.

Bauprozesse

Bauprozesse bezeichnen einheitliche Vorgänge, in welche der gesamte Tunnelbau gegliedert werden kann. Beispiele sind: Fels ausbrechen, Ausbruchmaterial bzw. Baumaterial transportieren, Beton in eine Schalung einbringen, Spritzbeton an der Tunnelwand anbringen etc. Pro Bauprozess werden die Kosten sowie der Energieverbrauch abgeschätzt (falls es eine Abhängigkeit zum Tunneldurchmesser gibt).

Bauverfahren

Bauverfahren sind Methoden zum Abbau des Felsens, meist in Verbindung mit bestimmten Methoden zur Ausbruchsicherung, zur Abdichtung und zum Einbau der Innengewölbes. Für die meisten Bauprozesse gibt es verschiedene Bauverfahren, die sich u.a. in den Kosten und im Energieverbrauch unterscheiden. Oft hängt das gewählte Bauverfahren vom Gestein ab, durch den der Tunnel getrieben wird (z.B. über die Sicherungsklasse).

Graue Energie

Die graue Energie eines Produktes ist die benötigte Energie für dessen Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung. Berücksichtigt wird der Energieeinsatz aller angewandten Produktionsprozesse von der Rohstoffgewinnung über allfällige Zwischenprodukte bis zum Endprodukt.

Impulswiderstand

Bremsende Kraft, u.a. infolge der Nutzung von Umgebungsluft im Zug, z.B. für die Kühlung von Fahrmotoren bzw. Trafos und für die Klimatisierung/Heizung von Reisezugwagen. Diese Luft muss auf die Zuggeschwindigkeit beschleunigt werden, was den Zug bremst bzw. Energie benötigt. Deshalb ist der Impulswiderstand in guter Näherung proportional zur Zuggeschwindigkeit.

Laufwiderstand

Kraft, die bremsend auf einen Zug (oder ein Fahrzeug generell) wirkt, indem kinetische Energie durch verschiedene Reibungsprozesse in Wärmeenergie

umgewandelt wird. Damit ein Zug in der Ebene (d.h. ohne Änderung der potenziellen Energie im Erdschwerefeld) mit konstanter Geschwindigkeit fährt, muss der Laufwiderstand durch die Antriebskraft der Fahrmotoren und damit durch Einsatz von Traktionsenergie laufend kompensiert werden. Der Laufwiderstand setzt sich zusammen aus Roll-, Impuls- und Luftwiderstand (in Spezialsituationen, wie etwa beim Anfahren, kommen weitere Beiträge, z.B. der Losbrechwiderstand, dazu).

Luftwiderstand

Bremsende Kraft infolge Druckunterschied zwischen Bug und Heck sowie der Reibung zwischen der Zugoberfläche und der Umgebungsluft, die den Zug umströmt und dabei kinetische Energie der Fahrt in kinetische Energie der Molekülbewegung, d.h. Wärme, umwandelt (in der Luft und am Zug). Der Luftwiderstand ist in guter Näherung proportional zum Quadrat der Zuggeschwindigkeit (im Bereich der massgeblichen Zuggeschwindigkeiten). Der Luftwiderstand kann gemessen oder mittels aerodynamischer Modelle rechnerisch abgeschätzt werden.

Rohbau

Der Rohbau ist der Zustand, nach dem Hohlraum ausgebrochen, gesichert und mit der permanenten Innenschale ausgebaut wurde. Meist gehören auch die seitlichen Bankette dazu. Der Einbau der Fahrbahnplatte und die Ausrüstung mit Schienen, der Fahrleitung usw. werden demgegenüber vom Unternehmer Bahntechnik vorgenommen.

Rollwiderstand

Bremsende Kraft infolge Reibung zwischen Schiene und Rad (und in einem geringeren Ausmass zwischen Fahrleitung und Pantograph) (d.h. Reibung zwischen Festkörpern). Der Rollwiderstand ist in guter Näherung unabhängig von der Zuggeschwindigkeit und vielen anderen Einflüssen (z.B. Art des Wagens), da er – neben der Masse des Zuges – nur vom Aufbau des Rades und der Schiene abhängt.

Schutterung

Abtransportieren des Ausbruchmaterials von der Ortsbrust zum Tunnelportal.

Traktionsenergie

Antriebsenergie für die Beförderung von Reise- und Güterzugwagen (inkl. Lokomotive). Definitionsgemäss entspricht diese Energie dem Produkt aus (mittlerem) Laufwiderstand und zurückgelegtem Weg.

Tunnelfaktor

Mittlerer Faktor, um den der Luftwiderstand bei Tunnelfahrt höher ist als auf offener Strecke. Der Tunnelfaktor ist u.a. von der freien Tunnelquerschnittsfläche, der Querschnittsfläche des Zugs sowie der Zuglänge abhängig.

A3.2 Abkürzungen

A	Rollwiderstand [N] oder Ausmass
AG	Aktiengesellschaft
B	Impulswiderstand
C	Luftwiderstandsbeiwert
CBT	Ceneri Basistunnel
CEX	Cargo-Express (Güterzugangebot)
D	Durchmesser (eines Bahntunnels)
DB	Deutsche Bahn
evtl.	eventuell
EHP	Einheitspreis
F_{ae}	Freie Tunnel-Querschnittsfläche (Luftraum in Abwesenheit eines Zuges)
f_T	Tunnelfaktor (Faktor, um den Luftwiderstand bei Tunnelfahrt höher ist)
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s ²)
GBT	Gotthard Basistunnel
ggf.	gegebenenfalls
GrETu	«Graue Energie Bahntunnel» (Projekt-Kurzbezeichnung)
h	Stunde
h_{sok}	Abstand zwischen Schienenoberkante und Tunnelmittelpunkt (vgl. Abbildung 9 auf Seite 42)
K	Kosten
KEA	Kumulierter Energieaufwand (Energiebedarf in Energieeinheiten für die Produktion einer Standardmenge eines definierten Stoffes)
KEP	Kurier-, Express- und Paketdienste (Güterzugangebot)
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunden (Energieeinheit)

LBT	Lötschberg-Basistunnel
m	Meter (als Masseinheit) bzw. Masse (als physikalische Grösse)
m'	Laufmeter (z.B. als Bezugsgrösse für Einheitspreise)
M	Material
Mio.	Million
MUF	Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels
MUL	Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein
N	Newton (Krafteinheit)
P	Preis
QS	Querschnitt (eines Tunnels)
s	Sekunde
SK	Sicherungsklasse
SM	Schildmaschine
Stk	Stück
t	Tonnen bzw. Zeit
t CO ₂ -Eq.	Tonnen CO ₂ -Äquivalent (bzgl. Treibhausgasemissionen äquivalente CO ₂ -Menge in t)
TBM	Tunnelbohrmaschine
u.a.	unter anderem
UIC	Union Internationale des Chemins de fer
UKV	unbegleiteter kombinierter Verkehr
vgl.	vergleiche
v _z	Zuggeschwindigkeit
WLV	Wagenladungsverkehr
z.B.	zum Beispiel
ZBT	Zimmerbergtunnel (I (bestehend) bzw. II (geplant))

A4 Bedienungsanleitung Excel-Tool

A4.1 Einleitung

Die Anwender des Tools sind Tunnelplaner, das BAV oder auch Bahnen. Es wird vorausgesetzt, dass der Anwender gute Fachkenntnisse vom Tunnelbau aufweist. Die korrekte Eingabe der einzelnen Werten ist essenziell, da wie bei allen Modellen gilt: «garbage in - garbage out».

Wichtig ist, dass bei der Anwendung des Tools die berechneten Zahlen nur mit gebührender Vorsicht mit effektiven planerischen Werten verglichen werden. Im Tool werden nur Aspekte, welche vom Durchmesser abhängig sind, berücksichtigt, und die Werte sind daher, besonders bei den Baukosten, oftmals deutlich kleiner als planerische Werte aus einem Projekt. Bei letzterem werden zusätzliche Kosten berücksichtigt, die unabhängig vom Tunneldurchmesser sind und für GrETu irrelevant sind.

Um mehrere Durchmesser untereinander zu vergleichen, müssen die Resultate von der Ergebnisse-Seite in die Ergebnis-Vergleich-Seite kopiert werden. Dies ist der einzige Schritt, welcher nicht «automatisiert» ist.

Für die Dateneingabe gibt es drei Stufen von Feldern. Die Darstellung ist in Abbildung 32 (Legende) und Abbildung 33 (Eingabefelder) abgebildet. Pflichtfelder ((a) unausgefüllt oder (c) ausgefüllt) müssen immer mit tunnel-spezifischen Werten versehen werden. Sie sind essenziell für das Modell und beinhalten etwa die Tunnellänge, Vortriebsmethode etc. Bei Legendenfeldern in blauer Schrift ((b) unausgefüllt (c) ausgefüllt) sind Default-Werte hinterlegt. Diese stehen neben dem Eingabefeld und werden, wenn keine Eingaben vorgenommen werden, automatisch übernommen. Die grau hinterlegten Legendenfelder sind abhängig von der Vortriebsmethode und können bei Bedarf leer bleiben. Die entsprechenden Eingabefelder werden je nach Auswahl automatisch eingefärbt (für Pflichtfelder (a), Felder mit Default-Werten (b) und nicht verwendete (d)). Wird ein falsches/nicht aktives Feld ausgefüllt, so wird die Eingabe mit roter Schrift (e) hervorgehoben. Wechselt ein Pflichteingabefeld (a) durch einen Wert nicht die Farbe zu (c), sondern bleibt orange (f), ist die Eingabe zusammen mit anderen Feldern noch nicht vollständig. Dies ist der Fall, wenn die Summe mehrerer Eingaben 100 % ergeben muss.

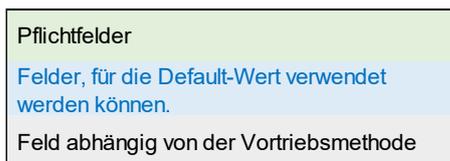


Abbildung 32: Darstellung der verschiedenen Legenden bei der Dateneingabe

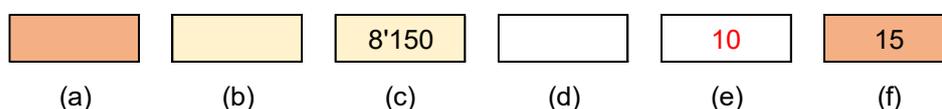


Abbildung 33: Darstellung der verschiedenen Eingabefelder

A4.2 Anwendung des Tools zur Bewertung einzelner Tunnel

Es sind zwei Tabellenblätter auszufüllen: Tunnelnennungen (Infrastruktur) und Betriebsdaten (Zugverkehr). Die meisten Eingabefelder (orange/gelbe Füllfarbe) haben Regeln hinterlegt, um falsche Eingaben zu verhindern. So sind zum Beispiel bei Prozentwerten nur ganze Zahlen erlaubt (d.h. z.B. 20 statt 0.2). Weisse Felder werden automatisch ausgefüllt oder müssen nicht aufgefüllt werden und dienen zur Kontrolle durch den Benutzer.

A4.2.1 Tunnelnennungen

Es sind total bis zu sechs Bauabschnitte möglich. Pro Vortriebsmethode ist ein neuer Bauabschnitt nötig. Auch Änderungen im Querschnitt oder bei der Ausbaustärke erzwingen eine Grenze zu einem neuen Bauabschnitt. Abbildung 9 zeigt den Querschnitt durch den Tunnel mit den meisten Eingabeparametern. Zusätzlich zu den Bauabschnitten können bis zu vier (Zwischen-) Angriffspunkte eingegeben werden. Ein neuer Angriffspunkt ist zu wählen, wenn der Zugang zu der Baustelle von einem anderen Portal/Zugang aus erfolgt.

Wichtig ist, dass Länge der Bauabschnitte bei Einspurtunnel nur für eine Röhre eingegeben wird. Die entsprechenden Resultate werden später mit der Anzahl Röhren multipliziert. Für die Materialbewirtschaftung und die Aufteilung nach Sicherungsklassen müssen sich die Eingabewerte zu 100 % addieren. Bei Anpassungen des Innendurchmessers wird empfohlen, h_{SOK} auch anzupassen. h_{SOK} soll im Normalfall so gewählt werden, dass die Bankette immer gleich gross bleiben (Länge der zugehörigen Kreissekante). Allgemein soll h_{SOK} so gross wie möglich sein, um den freien Querschnitt F_{ae} zu maximieren.

Tunnelnennungen					
Tunnelsystem	-	DS		DS: Doppelspur-, ES: Einspurtunnel	
Anzahl Röhren		1			
Gleisachsabstand (bei DS)	mm	4200			
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100 Jahre		Anpassung nur in begründeten Fällen!	
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	12'150		geplanter Wert, wird mit dem Modell variiert / optimiert. Alle normativen Anforderungen	
h_{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	3'300		Minimum: -12	Maximum: 3'504 vgl. auch Hinweise i
Anzahl Bauabschnitte	-	2		bezüglich Vortriebsmethode einheitlich	resultierendes F_{ae} 91.30 m ²
Anzahl Angriffspunkte	-	1		Punkte, von denen aus der Vortrieb erfolgt	
Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)			
		A	B		
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.	-	1	1		
Vortriebsmethode	-	TBM	SM		
- Schildvariante (bei SM)					
Länge Bauabschnitt	m	1'800	775		
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept		leicht	Tübbing		
Sicherungsklassen					
- SK 1	%				Standardw
- SK 2	%				optional (ü)
- SK 3	%				
- SK 4	%				
- SK 5	%				
- Summe SK 1 - 5					Summe di
Ringspaltstärke	mm		220		bei SM
Ausbruchsicherungsstärke	mm	300			bei TBM, N
Tübbingstärke	mm		300		bei SM
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³				85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300		
Ausbruchsdurchmesser	mm	13'350	13'790		Innendurc
Abdichtungskonzept	-	Vollabdichtung	Teilabdichtung		
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	0.9	2.2		vom Portal

Abbildung 34: Beispiel für die Eingabe der Tunnelnennungen (1/2)

Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1			
Zement					
- Transportdistanz	km	30			25 km
- Transportmittel	-				Strasse
Stahl					
- Transportdistanz	km				300 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie					
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kies					
- Transportdistanz	km	20			40 km
- Transportmittel	-	Bahn			Strasse
Tübbinge					
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Transporte im Tunnel					
Transportmittel - Baumaterialien	-				Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-	Förderband			Pneubetrieb
Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Wiederverwertung vor Ort		1			
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	10			
- Betonzuschlag	%	25			
- Herstellung von Baustoffen	%	0			
Abtransport Überschussmaterial					
- Herstellung von Baustoffen	%	0			
- Aufschüttungen	%	32			
- Deponie	%	33			
Summe	%	100			Summe ist korrekt (100%)
Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Herstellung von Baustoffen		1			
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Aufschüttungen					
- Transportdistanz	km				20 km
- Transportmittel	-				Strasse
Deponie					
- Transportdistanz	km	11.6			40 km
- Transportmittel	-	Strasse			Strasse

Abbildung 35: Beispiel für die Eingabe der Tunneldaten (2/2)

A4.2.2 Betriebsdaten

Im Registerblatt Betriebsdaten befinden sich alle Eingabewerte zum Betrieb des Tunnels. Es ist in zwei Subkategorien aufgeteilt: die im Tunnel verkehrende Zugtypen und ein Geschwindigkeitsprofil für die durch den Tunnel verkehrenden schnellsten Reisezüge.

Im Tunnel verkehrende Zugtypen

Maximal können zehn verschiedene Zugtypen eingegeben werden, für welche dann die Traktionsenergie in Abhängigkeit des Luft- und Rollwiderstands berechnet werden. Tabelle 19 zeigt die implementierten Zugtypen. Bei den Triebzügen kann durch die Länge gesteuert werden, ob sie z.B. in Einfach oder Doppeltraktion verkehren (weitere Möglichkeiten je nach Zugtyp). Ein Zugtyp kann mehrfach in unterschiedlichen Konfigurationen (Untertyp bei GZ, Länge bei Triebzügen) eingetragen werden.

Im Tunnel verkehrende Zugtypen					
Zugtyp	-				
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-				
Zuglänge	m				
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-				
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-				

Abbildung 36: Eingabewerte für die im Tunnel verkehrende Zugtypen

Zugtyp	Bezeichnung SBB / Unterteilung	Typ	Länge [m]	Bemerkung
Giruno	RABe 501	Triebzug	202.0	Länge in Einfachtraktion
FV-Dosto	RABe 502		200.6	Länge in Einfachtraktion
KISS	RABe 511		100.0	Länge 4-teilig Einfachtraktion
			150.0	Länge 6-teilig Einfachtraktion
FLIRT	RABe 521		74.1	Länge 4-teilig Einfachtraktion
	RABe 524		106.3	Länge 6-teilig Einfachtraktion
Standard-GZ	Zugreihe A70	lokbe- spannter Güterzug (Re 482)	600	bunt gemischt (WLW, UKV)
			300	Ganzzug (homogen)
CEX (Cargo-Express)	Zugreihe A90		250	mit Containerwagen (KEP, Post) mit Schiebewandwagen

Tabelle 19: Zugtypen

Geschwindigkeitsprofil

Hier sind die Werte für die beiden Portale (km 0 und Wert entsprechend der Gesamtlänge), sowie für bis zu drei weiteren Stellen pro Fahrtrichtung einzutragen. Gerechnet wird mit linear interpolierten Werten zwischen den Stützstellen (vgl. graphische Visualisierung), wobei maximal die Höchstgeschwindigkeit des jeweiligen Zugtyps verwendet wird. Durch die Angabe eines Geschwindigkeitsprofils sollen möglichst realistische Werte vorgegeben werden (abhängig von Steigung, zulässiger Geschwindigkeit im Zulauf zum Tunnel etc.). Aus betrieblichen Gründen reduzierte Geschwindigkeiten (besetzter Streckenabschnitt in Fahrtrichtung, energieoptimiertes Fahren) ist in der Regel nicht zu berücksichtigen.

Geschwindigkeitsprofil					
Distanz ab Portal in Richtung 1 (max.) Zuggeschwindigkeit	km				
	km/h				
Distanz ab Portal in Richtung 2 (max.) Zuggeschwindigkeit	km				
	km/h				

Abbildung 37: Eingabewerte für das Geschwindigkeitsprofil

A4.3 Anpassung von Modellparametern durch den Tool-Administrator

Abgesehen von den Eingabe-Tabellenblätter und denjenigen mit den Resultaten sind die restlichen Registerkarten mit einem Passwort gesperrt, da bei der Beurteilung einzelner Tunnel durch den Anwender an diesen keine Anpassungen gemacht werden sollen.

Nach Deaktivierung des Passwortschutzes und dem Entsperren der entsprechenden Tabellenblätter können seitens des Administrators Anpassungen

an den Modellparametern vorgenommen werden. Diese finden sich alle im Tabellenblatt «Parameter»:

- Wichtige Bewertungsparameter finden sich ab Zeile 202 (Bahnstrompreis, Anteil erneuerbarer Energie für die Traktion, Monetarisierung von Treibhausgasemissionen und Diskontrate).
- *Parameter zu den Baukosten sowie zum Energieverbrauch finden sich in den Zeilen 4 – 145*
- *Geometrische Parameter zum Tunnel- bzw. Lichtraumprofil sind in den Zeilen 148 – 154 festgehalten.*
- *Die Parameter zur Berechnung der Traktionsenergie sind in den Zeilen 157 – 199 dokumentiert.*

Anpassungen sollten primär an den Modellparametern ab Zeile 202 ins Auge gefasst werden (vgl. auch Kapitel 9.2). Bei allen anderen Modellparametern sollten Anpassungen nur in gut begründeten Fällen vorgenommen werden.

A5 Dokumentation von Kosten, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in der Bauphase

A5.1 Einheitskosten

Die nachfolgend tabellierten Einheitspreise zur rechnerischen Ermittlung der Kosten pro Bauprozess stammen aus sieben verschiedenen Bauprojekten aus allen Projektphasen (Vorprojekt bis zur Kostenanalyse des ausgeführten Projektes). Mit einer Ausnahme stammen die Grundlagen aus den letzten acht Jahren. Die zugehörigen Tunnel dürfen nicht genannt. Da in verschiedenen Quellen oft (leicht) unterschiedliche Einheitspreise verwendet werden sind nachfolgend in der Regel (gerundete) Mittelwerte und nicht zitierbare Einzelwerte dokumentiert. Es ist deshalb nicht möglich, den einzelnen Werten eine eindeutige Quelle zuzuordnen.

Die Einheitspreise für den MUL-Vortrieb sind mit den grössten Unsicherheiten verbunden. Die Baukosten wurden von der SBB mithilfe von fünf Tunnels mit verschiedenen Vortriebsmethoden validiert.

MUF

Bauprozess		SK	Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Vortrieb		-	m ³	110	
Ausbruch- sicherung	Bewehrung	SK 1	m ²	15	Einlagig K188 für 70 % des Umfanges
		SK 2	m ²	15	Zweilagig K188 für 70 % des Umfanges
		SK 3	m ²	20	Zweilagig K355 für 80 % des Umfanges
		SK 4	m ²	20	Zweilagig K355
		SK 5	m ²	20	Zweilagig K355
Stahleinbau	SK 4	t	3'500	Alle 2 m' ein TH25 für 65 % des Umfanges	
	SK 5	t	3'500	Alle 1.5 m' ein TH25 für 65 % des Umfanges	
Spritzbeton		SK 1 - 5	m ³	350	

Tabelle 20: Einheitskosten und Annahmen für den MUF-Vortrieb

MUL

Bauprozess		SK	Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Vortrieb		-	m ³	100	
Ausbruch- sicherung	Spritzbeton	-	m ³	350	
	Bewehrung		m ²	2.5	
	Stahleinbau		t	3'500	Alle 1.5 m' ein TH25 für 65 % des Umfanges

Tabelle 21: Einheitskosten und Annahmen für den MUL-Vortrieb

SM

Bauprozess		SK	Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Vortrieb	Mechanisch	-	m ³	50	
	Erddruck	-	m ³	140	
	Hydro	-	m ³	160	
Ausbruch- sicherung	Hinterfüllung, Mörtel	-	m ³	300	Unterteilung gebundenes/ungebundenes Material bei 120° (unteres Drittel) für Mechanisches Schild und 360° bei Hydro- und EBP-Schild
	Hinterfüllung, Kies	-	m ³	350	
	Tübbing, Beton	-	m ³	420	
	Tübbing, Bewehrung	-	kg	2.5	

Tabelle 22: Einheitskosten und Annahmen für den SM-Vortrieb

SPV

Bauprozess		SK	Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Vortrieb		SK 1	m ³	55	
		SK 2	m ³	60	
		SK 3	m ³	80	
		SK 4	m ³	120	
		SK 5	m ³	180	
Ausbruch- sicherung	Anker	SK 2	Stk	95	Alle 2 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 4 m
		SK 3	Stk	95	Alle 1.5 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 4 m
		SK 4	Stk	120	Alle 1.2 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 6 m
		SK 5	Stk	160	Alle 1 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 8 m
Bewehrung		SK 1	m ²	15	Einlagig K188 für 70 % des Umfanges
		SK 2	m ²	15	Zweilagig K188 für 70 % des Umfanges
		SK 3	m ²	20	Zweilagig K355 für 80 % des Umfanges
		SK 4	m ²	20	Zweilagig K355
		SK 5	m ²	20	Zweilagig K355
Stahleinbau		SK 4	t	3'500	Alle 1.2 m ein TH36 für 65 % des Umfanges
		SK 5	t	3'500	Alle 1 m ein TH44 für 85 % des Umfanges
Spritzbeton		SK 1 - 5	m ³	350	

Tabelle 23: Einheitskosten und Annahmen für den SPV-Vortrieb

TBM

Bauprozess		SK	Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Vortrieb		SK 1	m ³	70	
		SK 2	m ³	75	
		SK 3	m ³	80	
		SK 4	m ³	100	
		SK 5	m ³	160	
Ausbruch- sicherung	Anker	SK 2	Stk	95	Alle 2 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 4 m
		SK 3	Stk	95	Alle 1.5 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 4 m
		SK 4	Stk	120	Alle 1.2 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 6 m
		SK 5	Stk	160	Alle 1 m und pro 4 m Umfang in oberen 50 %, Ankerlänge 8 m
		Bewehrung	SK 1	m ²	15
SK 2	m ²		15	Zweilagig K188 für 70 % des Umfanges	
SK 3	m ²		20	Zweilagig K355 für 80 % des Umfanges	
SK 4	m ²		20	Zweilagig K355	
SK 5	m ²		20	Zweilagig K355	
Stahleinbau	SK 4	t	3'500	Alle 1.5 m' ein 4-Grut-Gitterträger für 65 % des Umfanges	
	SK 5	t	3'500	Alle 1 m ein HEB160 für 85 % des Umfanges	
Spritzbeton		SK 1 - 5	m ³	500	

Tabelle 24: Einheitskosten und Annahmen für den TBM-Vortrieb

Alle Vortriebsmethoden

Bauprozess		Einheit	EHP [CHF]	Annahmen
Abdichtung		m ²	100	Teilabdichtung deckt 65 % des Gesamtumfangs ab
Innenge- wölbe	Beton	m ³	300	
	Sohle/Bankett, Beton	m ³	200	Anteil gebundenes Material in Sohle 65 %
	Sohle, Kies	m ³	20	Anteil ungebundenes Material in Sohle 35 %
	Bankett, Beweh- rung	kg	2.5	80 kg/m ³
Material- bewirt- schaftung	Lokal, Aufschüttung	m ³	5	
	Lokal, Betonzuschlag	m ³	-20	²⁴
	Lokal, Herstellung von Baustoffen	m ³	-20	²⁴
	Extern, Aufschüttung	m ³	15	
	Extern, Herstellung von Baustoffen	m ³	40	
	Extern, Deponie	m ³	60	

Tabelle 25: Einheitskosten und Annahmen für alle Vortriebsmethoden

A5.2 Energieverbrauch

Die nachfolgenden Werte für den Energieverbrauch der massgeblichen Bauprozesse basieren auf effektiv gemessenen Werten von Bauunternehmungen im Tunnelbau, welche mit den Quellen [11] - [25] verglichen wurden. Analog zum Abschnitt A5.1 gilt, dass sich die aufgeführten Werte in der Regel nicht einer einzigen, definierten Quelle zuordnen lassen. Zudem sind Energieverbräuche in der Literatur relativ schlecht dokumentiert, u.a. weil sie für die Planung von Tunnelbauwerken in der Regel nicht gebraucht werden (die Kosten des Energieverbrauchs sind in den Einheitspreisen enthalten).

²⁴ Der negative Einheitspreis ergibt sich aus den Material- bzw. Kosteneinsparungen in einem anderen Bauprozesse.

Bauprozess	Einheit	Wert
Materialtransport - Förderband	kWh/tkm	0.15
Materialtransport - Hydraulisch	kWh/tkm	1.5
Vortrieb - MUL - Strom	kWh/m ³	6
Vortrieb - MUL - Diesel	l/m ³	4
Vortrieb - MUF - Strom	kWh/m ³	14
Vortrieb - MUF - Diesel	l/m ³	5
Vortrieb - TBM	kWh/m ³	7
Vortrieb - SPV - Strom	kWh/m ³	20
Vortrieb - SPV - Diesel	l/m ³	2.3
Vortrieb - SM - Mechanisch	kWh/m ³	5
Vortrieb - SM - Erddruck	kWh/m ³	35
Vortrieb - SM - Hydro	kWh/m ³	75
Ausbruchsicherung/Innenverkleidung etc. Maschinell (TBM/SM) - Strom	kWh/m ³	5
Ausbruchsicherung/Innenverkleidung etc. Konventionell - Strom	kWh/m ³	3
Ausbruchsicherung/Innenverkleidung etc. Konventionell - Diesel	l/m ³	5
Betonzuschlag	kWh/m ³	3.5
Herstellung von Baustoffen	kWh/m ³	3.5
Aufschüttungen	kWh/m ³	2
Deponie	kWh/m ³	3

Tabelle 26: Energieverbrauch der Bauprozesse

Energie				
Werte aus Ecoinvent. Datensatz: Ecoinvent v 3.6	Einheit Simapro	kg CO2	MJ KEA	kWh KEA
Beton	m3	2.05E+02	8.37E+02	2.32E+02
Stahl	t	2.04E+00		7.00E+00
Kunststoff PVC	kg	2.59E+00	6.17E+01	1.71E+01
Strom Bahn heute	kWh	6.16E-03	5.09E+00	1.41E+00
Strom Bahn Zukunft	kWh	5.85E-03	4.75E+00	1.32E+00
Strom Niederspannung (z.B. Baustelle)	kWh	1.05E-01	7.95E+00	2.21E+00
Strom Mittelspannung (z.B. Lüftung)	kWh	9.82E-02	7.53E+00	2.09E+00
Bahntransport	tkm	1.44E-02	6.50E-01	1.81E-01
LkW-Transport	tkm	1.62E-01	2.66E+00	7.39E-01
Diesel	l	3.14E+00	4.77E+01	1.32E+01
Kies	t	6.34E+00		3.38E+01

Tabelle 27: Basiswerte für Treibhausgasemissionen

A6 Berechnung Traktionsenergie

A6.1 Einleitung

Im Folgenden wird dargestellt, wie gross für eine spezifische Zugkomposition die Traktionsenergie ist, um einen geraden, ebenen Tunnelabschnitt mit linear steigender, abfallender bzw. konstanter Geschwindigkeit zu durchfahren. Durch einfache Aggregation über alle Tunnelabschnitte (charakterisiert durch einen linearen Geschwindigkeitsverlauf) sowie die Zahl der Zugfahrten pro Komposition, Jahr und Fahrrichtung lässt sich daraus die gesamte jährliche Traktionsenergie für die Gewährleistung des Zugbetriebs im Tunnel ermitteln.

Die Traktionsenergie pro Tunnelabschnitt und Zugkomposition wird schrittweise wie folgt ermittelt:

- Ermittlung des Laufwiderstands auf offener Strecke bei einer definierten Zuggeschwindigkeit v_z als Summe aus Roll-, Impuls- und Luftwiderstand,
- Erhöhung des Laufwiderstands durch die Fahrt in einem Tunnel (relativ zu einer Fahrt auf offener Strecke),
- Ermittlung der Traktionsenergie über eine Strecke $\Delta x = x_1 - x_0$, wobei die Geschwindigkeiten $v_z(x_1) = v_{z,1}$ und $v_z(x_0) = v_{z,0}$ gegeben sind und die Geschwindigkeitsänderung dazwischen linear zu- bzw. abnimmt (oder konstant bleibt).

A6.2 Laufwiderstand auf offener Strecke

Der Laufwiderstand ist die Kraft, die bremsend auf einen Zug (oder ein Fahrzeug generell) wirkt. Sie bewirkt, dass kinetische Energie des Zuges in Wärmeenergie der Schiene, am Zug, der Fahrleitung sowie der Umgebungsluft umgewandelt wird. Damit ein Zug geradeaus in der Ebene mit konstanter Geschwindigkeit fährt, muss der Laufwiderstand durch die Antriebskraft der Fahrmotoren und damit durch Einsatz von Traktionsenergie kompensiert werden. Ist die Antriebskraft in der Ebene grösser als der Laufwiderstand, so beschleunigt der Zug, im gegenteiligen Fall wird er abgebremst.

Messungen zeigen, dass der Laufwiderstand R_{0s} für eine Fahrt mit üblicher Geschwindigkeit auf offener Strecke in guter Näherung als Polynom 2. Grades in der Zuggeschwindigkeit v_z ausgedrückt werden kann. Gemäss der Formel von Davis [26] wird der Zusammenhang ohne Windeinfluss wie folgt beschrieben:

$$R_{oS} = A + B \cdot v_Z + C \cdot v_Z^2$$

wobei

- A: Rollwiderstand (in N). Dieser beschreibt die von der Geschwindigkeit unabhängige Reibungskraft zwischen Schiene und Rad. Gemäss den Formeln der elementaren Mechanik gilt in der Ebene: $A = m_Z g \mu_Z$ mit
 m_Z : Masse des Zuges [kg]
 g : Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2) und
 μ_Z : mittlerer Rollwiderstandsbeiwert (dimensionslos).
- B: Impulswiderstand (in Nh/km, wenn v_Z in km/h gemessen wird). Dieser beschreibt u.a. die erforderliche Impulsänderung der Luft, welche für die Transformatoren, Fahrmotoren- und Bremsenkühlung sowie für die Klimatisierung zwischen der Umgebung und der Zug ausgetauscht wird.
- C: Luftwiderstand (in Nh^2/km^2) beschreibt den Luft- bzw. aerodynamischen Widerstand (ohne Wind).

Der Beitrag des Impulswiderstands ist deutlich kleiner als derjenige des Rollwiderstands und – ausser bei sehr tiefen Geschwindigkeiten - unabhängig von der Zuggeschwindigkeit auch deutlich kleiner als der Luftwiderstand (vgl. das Beispiel in Abbildung 6). Relative Beiträge der drei bremsenden Kräfte zur Traktionsenergie, um eine konstante Geschwindigkeit bei Tunnelfahrt aufrechtzuerhalten (approximative Zahlen für eine Fahrt des Hochgeschwindigkeitszugs 2x RABe 501 (Giruno) mit 160 (links), 180 (Mitte) bzw. 200 km/h (rechts) durch einen Tunnel mit einer freien Querschnittsfläche von 75 m^2 (d. h. Innendurchmesser 10.5 m)). Dies gilt nicht nur für die Fahrt im Freien, sondern auch für eine Tunnelfahrt. Für die Abschätzung der Traktionsenergie ist es deshalb üblich, den Impulswiderstand zu vernachlässigen.

Die Parameter m_Z , μ_Z und C sind in den folgenden beiden Tabellen dargestellt. Dazu Folgendes:

- Die Werte zu den Triebzügen (vgl. Tabelle 28) stammen von den Herstellern.
- Die Werte für Güterzüge (Tabelle 29) werden aus Erfahrungswerten für die Lokomotive (für die vorliegende Studie Re 482) sowie für einzelne Güterwagen abgeleitet. Gemäss Angaben der SBB gelten folgenden Werte:
 - Gewicht Re 482: 82 t²⁵
 - Rollwiderstandsbeiwert Re 482: 0.0025
 - Rollwiderstandsbeiwert Güterwagen: 0.0013
 - Luftwiderstandsbeiwert Re 482: 0.319 N h²/km²

25 Der Wert 82 t gilt für die im Regionalverkehr in Deutschland eingesetzte Variante. Die in der Schweiz eingesetzten Fahrzeuge weisen ein Gewicht von 85 t auf. Aufgrund der fehlenden Abhängigkeit vom Tunneldurchmesser hat der Wert keinen Einfluss auf die untersuchten Optimierungsgrössen.

— Luftwiderstandsbeiwert Güterwagen: $0.08 \text{ N h}^2/\text{km}^2$

Zugtyp	Zuglänge [m]	Zuggewicht m_z [t]	Rollwiderstandsbeiwert μ_z	Luftwiderstandsbeiwert C
Giruno	202	415	0.00201	0.56
	404	829	0.00201	0.73
FV-Dosto	201	518	0.00205	0.60
	401	1'036	0.00205	0.78
KISS	100	237	0.00210	0.45
	150	335	0.00210	0.52
	200	474	0.00210	0.59
	300	670	0.00210	0.73
Flirt	75	137	0.00250	0.50
	105	194	0.00250	0.55
	150	275	0.00250	0.65
	210	388	0.00250	0.72
	225	412	0.00250	0.74

Tabelle 28: Zuggewichte, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwerte für die untersuchten Reisezugkompositionen

Zugtyp	Zuglänge [m]	Untertyp	Anz. Loks pro Zug	Anz. Güterwagen/Zug	Gewicht pro Güterwagen [t]	Zuggewicht m_z [t]	Rollwiderstandsbeiwert μ_z	Luftwiderstandsbeiwert C
Standard-Güterzug	300	bunt gemischt (WLV, UKV)	2	19	45	1'019	0.00149	1.95
		Ganzzug (homogen)	3	17	90	1'776	0.00147	1.89
	600	bunt gemischt (WLV, UKV)	3	38	45	1'956	0.00145	3.57
		Ganzzug (homogen)	3	38	45	1'956	0.00145	3.57
Cargo-Express	250	Containerwagen	1	15	45	757	0.00143	1.52
		Schiebewandwagen	1	16	45	802	0.00142	1.60

Tabelle 29: Zuggewichte, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwerte für die untersuchten Güterzugkompositionen

Alle oben angegebenen Zuggewichte, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsbeiwerte stammen aus dem System FOS (Formationservice), in welchem Daten zu Zugkompositionen abgelegt sind. Diese Werte werden von den SBB verwendet, um mit Hilfe der sogenannten ZLR-Toolbox realitätsnahe fahrdynamische Berechnungen durchzuführen, was eine Berechnung des Fahrwiderstands auf offener Strecke und in Tunneln erfordert.

Die obigen Werte der SBB weisen einige Ungenauigkeiten und Schwächen auf, die kurz diskutiert werden sollen:

— Es ist nicht plausibel, dass der Rollwiderstand von Güterzügen kleiner sein soll als von modernen Triebzügen. Für die Optimierung des Tunneldurchmessers hat dies jedoch keinen Einfluss, da der Rollwiderstand für die Fahrt auf offener Strecke und in Tunneln gleich ist und damit auch nicht vom Tunneldurchmesser abhängt. Mit dem gleichen Grund, wie die Kosten für die Eisenbahntechnik nicht berücksichtigt wird, könnte auch der Rollwiderstand weggelassen werden. Er wird lediglich berücksichtigt, um im Rahmen der Validierung während der Phase 3 die berechnete Traktionsenergie mit gemessenen Werten vergleichen und so die Berechnungen plausibilisieren zu können (vgl. [55]).

- Beim Güterverkehr wird den je nach Zugformation unterschiedlichen Wagenquerschnitten und aerodynamischen Rauigkeiten entlang eines Zuges (Unterschiede zwischen Ganzzug und bunt gemischtem Güterzug) mit den obigen Werten für den Luftwiderstandsbeiwert tendenziell zu wenig Rechnung getragen. Angesichts der Unschärfen bei der Abschätzung der Zahl verschiedener Typen von Güterzügen, die durch einen Tunnel verkehren, genügt es jedoch, wenn die Mittelwerte für den Luftwiderstandsbeiwert in etwa korrekt sind. Dies dürfte der Fall sein. Zudem wurde bei Messungen an Güterzügen (vgl. [39]) festgestellt, dass die Unterschiede beim Luftwiderstand kleiner sind als angenommen, was die genannte Schwäche der verwendeten Werte relativiert.

A6.3 Laufwiderstand in einem Tunnel

A6.3.1 Einleitung: Bedeutung des Tunnelfaktors

Für den Laufwiderstand in einem Tunnel gilt im Vergleich zur offenen Strecke Folgendes:

- Der Rollwiderstand A ist unverändert
- Der Impulswiderstand $B \cdot v_Z$ ist zwar in einem Tunnel etwas höher als auf freier Strecke, ist aber im Vergleich zum Roll- und Luftwiderstand immer noch klein.
- Der Luftwiderstand $C \cdot v_Z^2$ ist in einem Tunnel signifikant höher.

Die Erhöhung des Luftwiderstands ist letztlich eine Folge der physikalischen Randbedingungen, die sich aus dem Vorhandensein der Tunnelwand ergeben. Beim Einfahren eines Zuges in einen Tunnel entstehen Druckwellen, die den Tunnel mit Schallgeschwindigkeit durchlaufen und an den Tunnelportalen unter Vorzeichenumkehrung reflektiert werden. Dadurch entsteht im Tunnel ein komplexes, zeit- und ortabhängiges Druckwellenmuster und ein zeitlich variabler Druckunterschied zwischen dem Bug und dem Heck des Zuges. Weiterhin muss der Zug das vor ihm liegende Luftvolumen in den verbleibenden freien Tunnelquerschnitt verdrängen. Dadurch entsteht eine erhöhte Umströmung des Zuges, die sich im Vergleich zur offenen Strecke in einer Zunahme des Luftwiderstands (Term proportional zu v_Z^2) bemerkbar macht.

Die angepasste Laufwiderstandsformel für die Tunnelfahrt lautet:

$$R_{Tu} = A + B \cdot v_Z + f_T \cdot C \cdot v_Z^2$$

A6.3.2 Modell zur Berechnung des Tunnelfaktors

Für den (mittleren) Tunnelfaktor f_T wurde von Prof. Helmut Sockel ein analytischer Ansatz für die CEN-Aerodynamiknorm [32] erarbeitet, der durch DB Systemtechnik in parametrisierter Form in eine dll-Programmbibliothek für die Fahrzeitberechnung und in das Tunnelrechenpaket «DBTunnel» [37] überführt wurde.²⁶

²⁶ Die Parametrisierung wurde von dipl.-Ing. univ. Hans-Joachim Wormstall-Reitschuster vorgenommen, der am Projekt GrETu massgeblich beteiligt war (Version 5.0.b vom 2. März 2018).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen auf, wie der Tunnelfaktor f_T von verschiedener Zug- bzw. Tunnelmerkmalen abhängt. Betrachtet werden ein Hochgeschwindigkeits-Triebzug (HGV), ein lokbespannter Reisezug sowie ein gemischter Güterzug. Die Merkmale mit dem grössten Einfluss sind die freie Tunnelquerschnittsfläche F_{ae} , (vgl. Abbildung 38) die Zugquerschnittsfläche (vgl. Abbildung 39) sowie die Zuglänge (vgl. Abbildung 40). Wenig ausgeprägt sich die Abhängigkeiten von der Tunnellänge (vgl. Abbildung 41) sowie der verschiedenen Beiwerte (vgl. Abbildung 42 - Abbildung 44). Da die Näherung, wonach der Luftwiderstand im Tunnel (gleich wie auf offene Strecke) mit dem Quadrat der Zuggeschwindigkeit zunimmt, gut ist, ist die Abhängigkeit des Tunnelfaktors von der Zuggeschwindigkeit gering (d.h. kleine Korrektur von der quadratischen Abhängigkeit, vgl. Abbildung 45).

In den Abbildungen ist jeweils dargestellt, wie sich der Tunnelfaktor bei Variation eines Parameters gemäss Tabelle 30 und Tabelle 31 zwischen den angegebenen Grenzen ändert. Alle anderen Parameter sind konstant und nehmen die in Tabelle 30 und Tabelle 31 fett dargestellten Werte an.

Zug	Geschwindigkeit v_z [km/h]	Zuglänge L_z [m]	c_w -Wert freie Strecke $c_{w,fs} [-]^{27}$	Zugquerschnittsfläche A_z [m ²]
Güterzug	60 - 120 - 160	150 - 450 - 700	1.64 - 3.96 - 5.73	10.0 - 11.0 - 12.0 ⇒ Umfang U_{tr} [m] 12.7 - 13.5 - 14.2
Lok-Zug	120 - 200 - 230	100 - 310 - 425	0.62 - 1.04 - 1.57	
HGV-Zug	250 - 300 - 320	130 - 200 - 400	0.41 - 0.55 - 1.06	

Tabelle 30: Aerodynamisch relevante Parameter der betrachteten Züge

Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Tunnellänge [m]	Reibungsbeiwert [10^{-3}]	freie Querschnittsfläche F_{ae} [m ²]	Umfang freie Querschnittsfläche [m]
100 - 200 - 300	500 - 2'000 - 20'000	20 - 40 - 60	60 - 92 - 120	32 - 39 - 45

Tabelle 31: Aerodynamisch relevante Parameter der betrachteten Tunnel

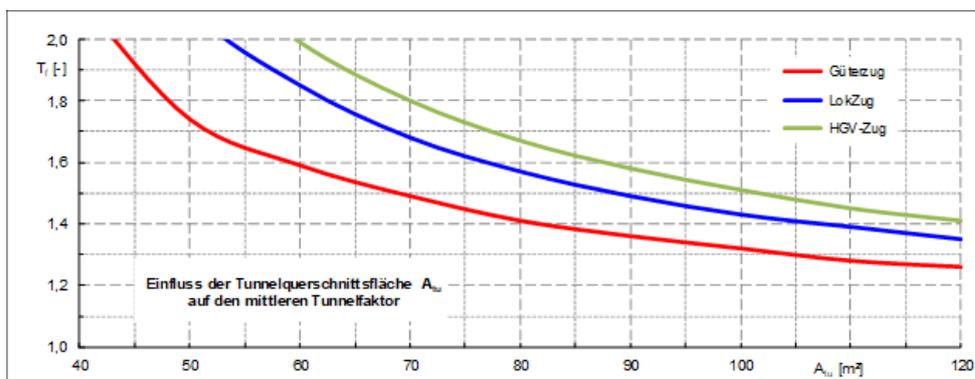


Abbildung 38: Einfluss der freien Tunnelquerschnittsfläche F_{ae} (hier als A_{tu} bezeichnet) auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

27 Die drei Werte, die für $c_{w,fs}$ pro Zeile aufgeführt sind, beziehen sich auf die drei in der dritten Spalte angegebenen Zuglängen

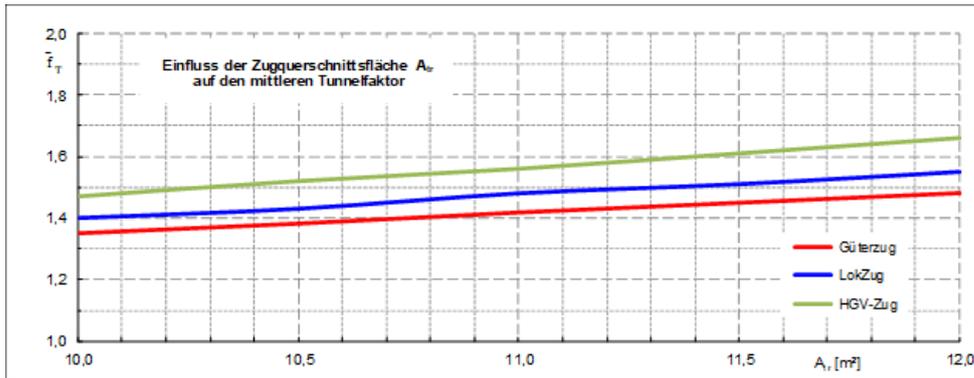


Abbildung 39: Einfluss der Zugquerschnittsfläche A_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

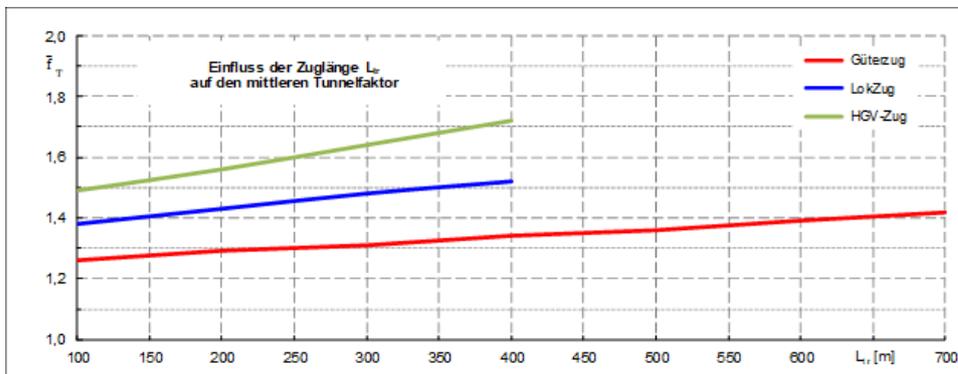


Abbildung 40: Einfluss der Zuglänge L_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

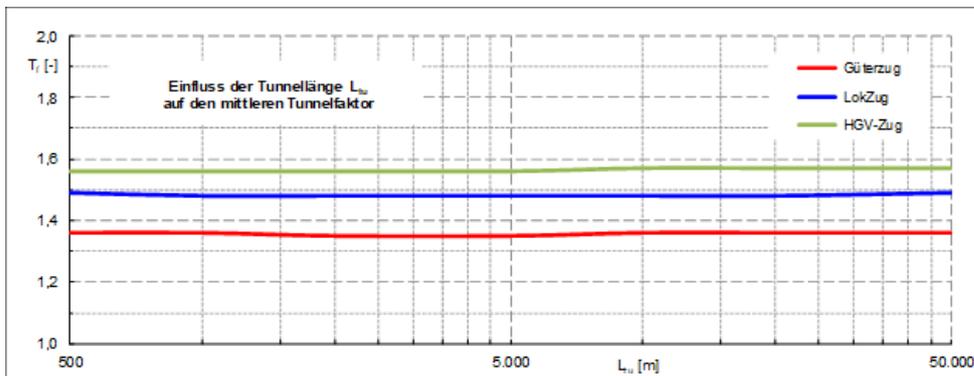


Abbildung 41: Einfluss der Tunnellänge L_w auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

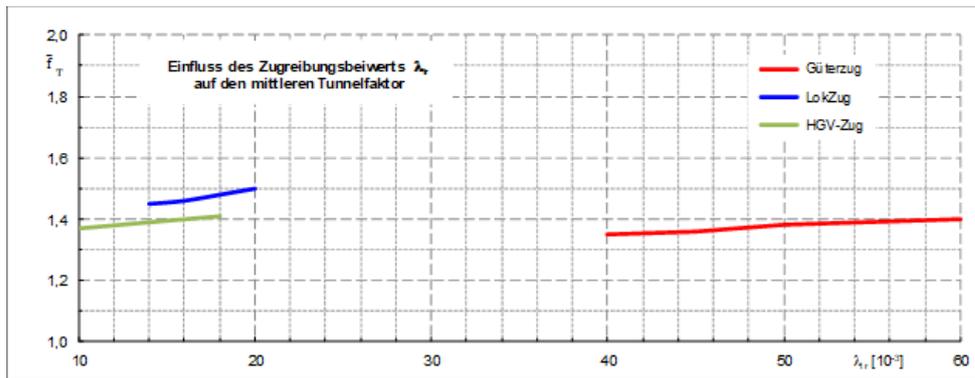


Abbildung 42: Einfluss des Zugreibungsbeiwerts λ_{tr} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

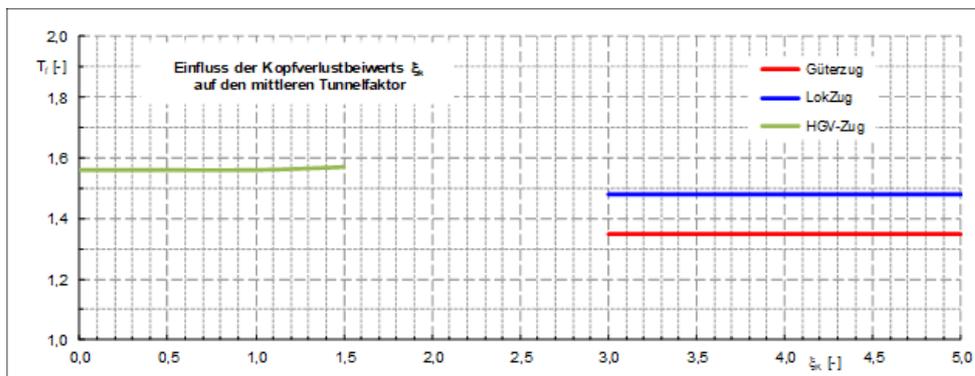


Abbildung 43: Einfluss des Kopfverlustbeiwerts ξ_k auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

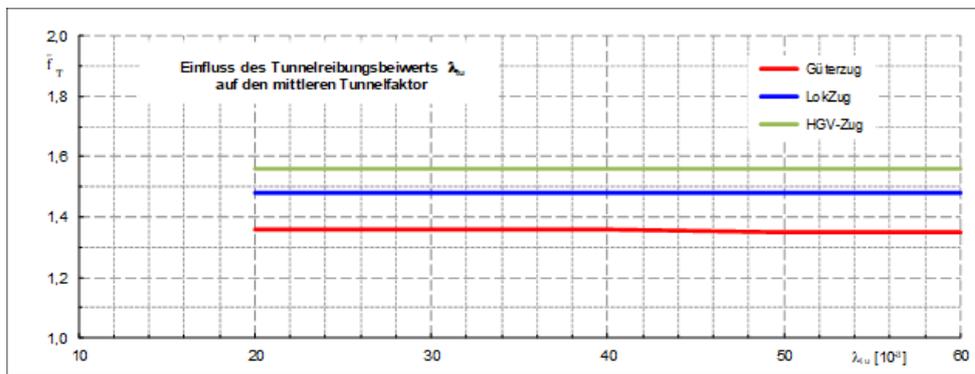


Abbildung 44: Einfluss des Tunnelreibungsbeiwerts λ_{tu} auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als T_f bezeichnet)

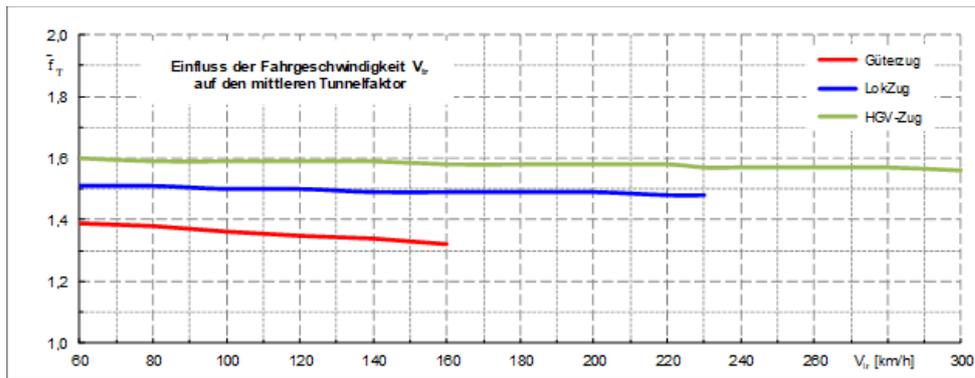


Abbildung 45: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit v_z auf den mittleren Tunnelfaktor f_T (hier als \bar{f}_T bezeichnet)

Hinweis: Ein mit der Geschwindigkeit v_z leicht abnehmender Wert von f_T bedeutet, dass der Luftwiderstand im Tunnel geringfügig weniger als mit dem Quadrat der Zuggeschwindigkeit ansteigt.

A6.4 Berechnung der Traktionsenergie

Fall 1: Konstante Zuggeschwindigkeit

Im einfachen Fall, dass ein Tunnelabschnitt der Länge l_T mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren wird, wird infolge des Laufwiderstands folgende Energie in Wärme umgewandelt und muss deshalb zugeführt werden, um eine konstante Zuggeschwindigkeit v_z aufrechtzuerhalten:

$$E_T = (A + B \cdot v_z + f_T \cdot C \cdot v_z^2) \cdot l_T \approx (A + f_T \cdot C \cdot v_z^2) \cdot l_T$$

Berücksichtigt man zudem einen Wirkungsgrad $\eta < 1$ des Antriebs, so ergibt sich folgende Traktionsenergie, die von den Fahrmotoren der Triebzüge bzw. der Re 482 (Güterverkehr) aufzubringen ist:

$$E_T = \eta \cdot (A + f_T \cdot C \cdot v_z^2) \cdot l_T$$

Für den Wirkungsgrad moderner Loks bzw. Triebwagen kann ein Wert von 0.86 verwendet werden.

Fall 2: Linearer Verlauf der Zuggeschwindigkeit

Für den Fall eines linearen Geschwindigkeitsverlaufs über den Streckenabschnitt $\Delta l_T = x_1 - x_0$ mit den Geschwindigkeiten $v_z(x_0) = v_{z,0}$ und $v_z(x_1) = v_{z,1}$ steigt der Beitrag des Luftwiderstands proportional zum Mittelwert des Quadrats von Anfangs- und Endgeschwindigkeit an. Es gilt dann folgende Formel:

$$E_T = h \cdot \left(A + \frac{1}{2} \cdot f_T \cdot C \cdot (v_{z,1}^2 + v_{z,2}^2) \right) \cdot l_T$$

A7 Dokumentation Inputparameter und Resultate untersuchte Tunnel

A7.1 Brüttenertunnel

Tunneldaten				
Tunnelsystem	-	ES		
Anzahl Röhren	-	2		
Gleisachsabstand (bei DS)	mm			
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100	100 Jahre	
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	8'300		
h _{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	2'312		
Anzahl Bauabschnitte	-	4		
Anzahl Angriffspunkte	-	4		
			Minimum: 1'600	Maximum: 2'597
			resultierendes F _{ge} 41.41 m ²	

Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)				
		A	B	C	D	
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.	-	1	2	3	4	
Vortriebsmethode	-	SM	SM	MUF	MUF	
- Schildvariante (bei SM)		Erddruck	Mechanisch			
Länge Bauabschnitt	m	1'975	5'075	1'175	385	
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept		Tübbinge	Tübbinge			
Sicherungsklassen						
- SK 1	%			0	5	
- SK 2	%			5	20	
- SK 3	%			15	50	
- SK 4	%			60	20	
- SK 5	%			20	5	
- Summe SK 1 - 5				100	100	
Ringspaltstärke	mm	150	150			
Ausbruchsstärke	mm			200	200	
Tübbingstärke	mm	280	280			
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³					85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300	300	300	
Ausbruchsdurchmesser	mm	9'760	9'760	9'300	9'300	
Abdichtungskonzept	-	Vollabdichtung	Teilabdichtung	Vollabdichtung	Vollabdichtung	
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	1	2.5	0.6	0.25	

Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)				
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1	2	3	4	
Zement						
- Transportdistanz	km	50	50	50	50	25 km
- Transportmittel	-	Bahn	Bahn	Bahn	Bahn	Strasse
Stahl						
- Transportdistanz	km					300 km
- Transportmittel	-					Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie						
- Transportdistanz	km	300	300	300	300	50 km
- Transportmittel	-					Strasse
Kies						
- Transportdistanz	km	50	50	50	50	40 km
- Transportmittel	-	Bahn	Bahn	Bahn	Bahn	Strasse
Tübbinge						
- Transportdistanz	km	1	1			50 km
- Transportmittel	-	Strasse	Strasse			Strasse
Transporte im Tunnel						
Transportmittel - Baumaterialien	-					Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-	Förderband	Förderband	Förderband	Förderband	Pneubetrieb

Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Wiederverwertung vor Ort		1	2	3	4
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	30	30	30	30
- Betonzuschlag	%	0	0	0	0
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0	0	0
Abtransport Überschussmaterial					
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0	0	0
- Aufschüttungen	%	10	10	10	10
- Deponie	%	60	60	60	60
Summe	%	100	100	100	100

Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)				
Herstellung von Baustoffen		1	2	3	4	
- Transportdistanz	km					50 km
- Transportmittel	-					Strasse
Aufschüttungen						
- Transportdistanz	km	5	5	5	5	20 km
- Transportmittel	-					Strasse
Deponie						
- Transportdistanz	km	50	50	50	50	40 km
- Transportmittel	-	Bahn	Bahn	Bahn	Bahn	Strasse

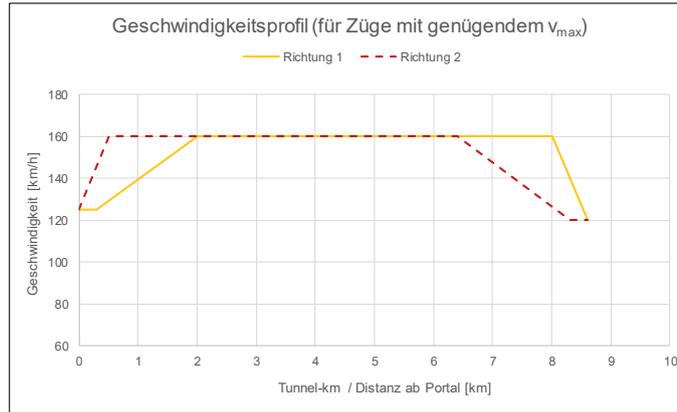
Betriebsdaten

Im Tunnel verkehrende Zugtypen

Zugtyp	-	Giruno	Giruno	FV-Dosto	FV-Dosto	KISS	Standard-GZ	Standard-GZ	CEX	CEX	
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-						bunt	gemisch	Ganzzug (hor)	Containerwag	Schiebewandwagen
Zuglänge	m	404	202	400	200	300	300	300	250	250	
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	36	36	60	12	72	14	6	4	1	
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	36	36	60	12	72	14	6	4	1	

Geschwindigkeitsprofil

Distanz ab Portal in Richtung 1	km	0	0.3	2	8	8.61
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	125	125	160	160	120
Distanz ab Portal in Richtung 2	km	0	0.5	6.4	8.3	8.61
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	125	160	160	120	120



Innendurchmesser		7'800	8'300	8'800	9'300	9'800
h_{sok}		2'300	2'312	2'740	3'120	3'400
total Baukosten	Mio. CHF	334.7	368.4	392.4	418.1	447.1
total Energieverbrauch	GWh	3'879	3'538	3'130	2'877	2'720
total Treibhausgasemissionen	CO ₂ t eq	105'393	113'395	113'186	114'630	118'556
Gesamtkosten	Mio. CHF	536.9	554.5	557.9	570.9	592.3

A7.2 Ceneri-Basistunnel

Tunneldaten					
Tunnelsystem	-	ES			
Anzahl Röhren		2			
Gleisachsabstand (bei DS)	mm				
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100	100 Jahre		
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	8'100			
h _{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	2'485	Minimum: 1'700	Maximum: 2'485	
Anzahl Bauabschnitte	-	4			
Anzahl Angriffspunkte	-	3			
				resultierendes F _{ab} 40.91 m ²	
Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)			
		A	B	C	D
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.	-	1	2	2	3
Vortriebsmethode	-	SPV	SPV	SPV	SPV
- Schildvariante (bei SM)					
Länge Bauabschnitt	m	800	8'098	6'001	562
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept					
Sicherungsklassen					
- SK 1	%	0	9	12	0
- SK 2	%	14	68	71	67
- SK 3	%	54	19	13	29
- SK 4	%	17	0	3	0
- SK 5	%	15	4	1	4
- Summe SK 1 - 5		100	100	100	100
Ringspaltstärke	mm				
Ausbruchsicherungsstärke	mm	250	250	200	250
Tübbingstärke	mm				
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³				85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300	300	300
Ausbruchsdurchmesser	mm	9'200	9'200	9'100	9'200
Abdichtungskonzept	-	Teilabdichtung	Teilabdichtung	Teilabdichtung	Teilabdichtung
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	0.4	6	5	0.3
Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1	2	3	
Zement					
- Transportdistanz	km	200	215	230	25 km
- Transportmittel	-	Bahn	Bahn	Bahn	Strasse
Stahl					
- Transportdistanz	km	20	30	20	300 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie					
- Transportdistanz	km	150	160	170	50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kies					
- Transportdistanz	km	210	220	230	40 km
- Transportmittel	-	Bahn	Bahn	Bahn	Strasse
Tübbinge					
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Transporte im Tunnel					
Transportmittel - Baumaterialien	-				Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-				Pneubetrieb
Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Wiederverwertung vor Ort		1	2	3	
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	15	15	15	
- Betonzuschlag	%	20	20	20	
- Herstellung von Baustoffen	%	3	3	3	
Abtransport Überschussmaterial					
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0	0	
- Aufschüttungen	%	15	15	15	
- Deponie	%	47	47	47	
Summe	%	100	100	100	
Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Herstellung von Baustoffen		1	2	3	
- Transportdistanz	km	10	10	10	50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Aufschüttungen					
- Transportdistanz	km	2	2	2	20 km
- Transportmittel	-				Strasse
Deponie					
- Transportdistanz	km	2	2	2	40 km
- Transportmittel	-	Förderband	Förderband	Förderband	Strasse

Betriebsdaten

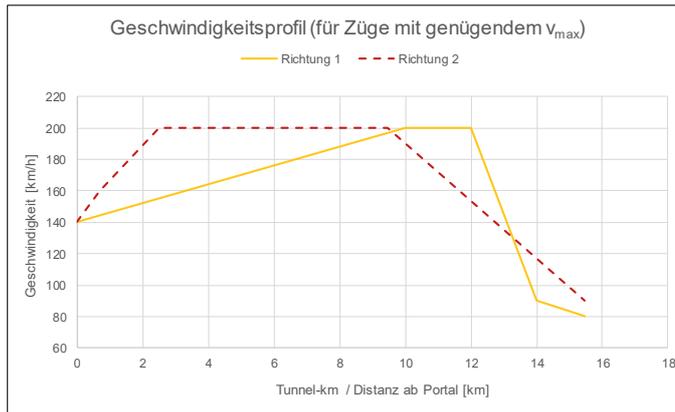
Im Tunnel verkehrende Zugtypen

Zugtyp	-	Giruno	Giruno	FLIRT	Standard-GZ	Standard-GZ						
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-				bunt gemisch	Ganzzug (homogen)						
Zuglänge	m	202	404	210	600	600						
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	72	34	17						
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	72	34	17						

Geschwindigkeitsprofil

Distanz ab Portal in Richtung 1	km	0	10	12	14	15.45
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	140	200	200	90	80

Distanz ab Portal in Richtung 2	km	0	0.7	2.5	9.45	15.45
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	140	160	200	200	90

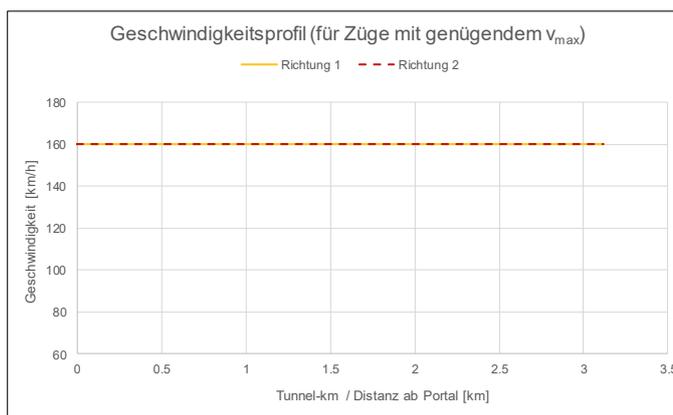


Innendurchmesser		7'600	8'100	8'600	9'100	9'600
h_{sok}		2'200	2'485	2'750	3'020	3'290
total Baukosten	Mio. CHF	428.9	465.0	503.0	541.8	581.6
total Energieverbrauch	GWh	4924.0	4424.7	4102.6	3880.0	3723.8
total Treibhausgasemissionen	CO2 t eq	170'872	176'966	184'901	193'327	202'173
Gesamtkosten	Mio. CHF	687.2	698.7	721.0	749.0	781.3

A7.3 Eppenbergtunnel

Tunneldaten				
Tunnelsystem	-	DS		
Anzahl Röhren	-	1		
Gleisachsabstand (bei DS)	mm	4200		
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100 Jahre		
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	12'150		
h _{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	3'300	Minimum: -12	Maximum: 3'504
Anzahl Bauabschnitte	-	2		
Anzahl Angriffspunkte	-	1		
Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)		
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.		A	B	
Vortriebsmethode		1	1	
- Schildvariante (bei SM)		SM	SM	
Länge Bauabschnitt		Mechanisch	Flüssigkeit	
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept		1'800	775	
Sicherungsklassen		Tübbing	Tübbing	
- SK 1				
- SK 2				
- SK 3				
- SK 4				
- SK 5				
- Summe SK 1 - 5				
Ringspaltstärke	mm	220	220	
Ausbruchsicherungsstärke	mm			
Tübbingstärke	mm	300	300	
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³	116	151	85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300	
Ausbruchsdurchmesser	mm	13'790	13'790	
Abdichtungskonzept	-	Teilabdichtung	Teilabdichtung	
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	1	2,1	
Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1		
Zement				
- Transportdistanz	km			25 km
- Transportmittel	-			Strasse
Stahl				
- Transportdistanz	km			300 km
- Transportmittel	-			Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie				
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Kies				
- Transportdistanz	km			40 km
- Transportmittel	-			Strasse
Tübbing				
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Transporte im Tunnel				
Transportmittel - Baumaterialien	-			Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-			Pneubetrieb
Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Wiederverwertung vor Ort		1		
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	10		
- Betonzuschlag	%	25		
- Herstellung von Baustoffen	%	0		
Abtransport Überschussmaterial				
- Herstellung von Baustoffen	%	0		
- Aufschüttungen	%	32		
- Deponie	%	33		
Summe	%	100		
Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Herstellung von Baustoffen		1		
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Aufschüttungen				
- Transportdistanz	km			20 km
- Transportmittel	-			Strasse
Deponie				
- Transportdistanz	km	11.6		40 km
- Transportmittel	-	Strasse		Strasse

Betriebsdaten										
Im Tunnel verkehrende Zugtypen										
Zugtyp	-	FV-Dosto	FV-Dosto	Flirt	Flirt	Standard-GZ	Standard-GZ			
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-					bunt gemisch	bunt gemischt (WLV, UKV)			
Zuglänge	m	400	200	75	150	600	300			
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	78	40	18	19	20	7			
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	67	34	18	18	22	12			
Geschwindigkeitsprofil										
Distanz ab Portal in Richtung 1	km	0	2.6	3.12						
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	160	160						
Distanz ab Portal in Richtung 2	km	0	2.12	3.12						
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	160	160						



Innendurchmesser		10'650	11'150	11'650	12'150	12'650
h_{sok}		2'180	2'250	2'810	3'300	4'000
total Baukosten	Mio. CHF	65.9	70.3	72.7	75.3	76.8
total Energieverbrauch	GWh	740.5	716.8	679.6	654.7	631.6
total Treibhausgasemissionen	CO ₂ t eq	27'061	28'717	28'329	28'241	27'253
Gesamtkosten	Mio. CHF	105.7	109.2	109.6	110.9	111.1

A7.4 Zimmerberg-Basistunnel II

A7.4.1 a): Variante 1

Tunneldaten					
Tunnelsystem	-	ES			
Anzahl Röhren		2			
Gleisachsabstand (bei DS)	mm				
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100	100 Jahre		
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	8'990			
h _{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	2'765	Minimum: 1'255	Maximum: 2'977	
Anzahl Bauabschnitte	-	2			
Anzahl Angriffspunkte	-	2			
				resultierendes F ₉₀ 50.74 m ²	
Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)			
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.	-	A	B		
Vortriebsmethode	-	1	2		
- Schildvariante (bei SM)		SM	SPV		
Länge Bauabschnitt	m	Mechanisch			
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept		10'710	1'725		
Sicherungsklassen		Tübbing	Leicht		
- SK 1	%				
- SK 2	%				
- SK 3	%				
- SK 4	%				
- SK 5	%				
- Summe SK 1 - 5					
Ringspaltstärke	mm	110			
Ausbruchsicherungsstärke	mm		300		
Tübbingstärke	mm	300			
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³				85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300		
Ausbruchsdurchmesser	mm	10'410	10'190		
Abdichtungskonzept	-	Teilabdichtung	Teilabdichtung		
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	5.35	0.9		
Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1	2		
Zement					
- Transportdistanz	km				25 km
- Transportmittel	-				Strasse
Stahl					
- Transportdistanz	km				300 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie					
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Kies					
- Transportdistanz	km				40 km
- Transportmittel	-				Strasse
Tübbing					
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Transporte im Tunnel					
Transportmittel - Baumaterialien	-				Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-				Pneubetrieb
Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Wiederverwertung vor Ort		1	2		
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	5	5		
- Betonzuschlag	%	30	40		
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0		
Abtransport Überschussmaterial					
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0		
- Aufschüttungen	%	15	20		
- Deponie	%	50	35		
Summe	%	100	100		
Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)			
Herstellung von Baustoffen		1	2		
- Transportdistanz	km				50 km
- Transportmittel	-				Strasse
Aufschüttungen					
- Transportdistanz	km				20 km
- Transportmittel	-				Strasse
Deponie					
- Transportdistanz	km				40 km
- Transportmittel	-				Strasse

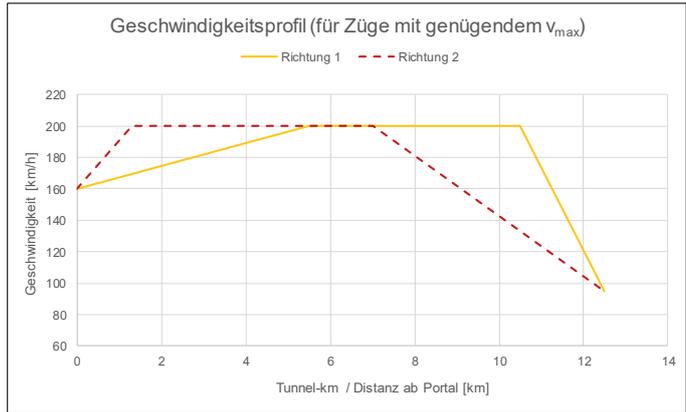
Betriebsdaten

Im Tunnel verkehrende Zugtypen

Zugtyp	-	Giruno	Giruno	FV-Dosto	FV-Dosto	KISS	KISS				
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-										
Zuglänge	m	404	202	400	200	300	150				
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	36	36	18	18				
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	36	36	18	18				

Geschwindigkeitsprofil

Distanz ab Portal in Richtung 1	km	0	5.5	10.5	12.5		
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	200	200	95		
Distanz ab Portal in Richtung 2	km	0	1.3	7	12.5		
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	200	200	95		



Innendurchmesser		7'990	8'490	8'990	9'490	9'990
h_{sok}		2'200	2'335	2'765	3'155	3'420
total Baukosten	Mio. CHF	429.0	465.7	492.3	520.5	554.2
total Energieverbrauch	GWh	4022.0	3610.0	3211.1	2965.1	2821.6
total Treibhausgasemissionen	CO2 t eq	168'751	179'470	181'915	186'201	194'788
Gesamtkosten	Mio. CHF	644.5	661.8	668.4	684.3	711.4

A7.4.2 b): Variante 3

Tunneldaten				
Tunnelsystem	-	ES		
Anzahl Röhren	-	2		
Gleisachsabstand (bei DS)	mm			
geplante Nutzungsdauer	Jahre	100	100 Jahre	
Soll-Innendurchmesser (inkl. t - Bautech. Nutzraum)	mm	9'990		
h _{SOK} (Tunnelmitte bis SOK)	mm	3'510	Minimum: 755	Maximum: 3'518
Anzahl Bauabschnitte	-	2		
Anzahl Angriffspunkte	-	2		
Tunnelbau		Nr. Bauabschnitt (bezüglich Vortriebsmethode einheitlich)		
Vortrieb von Angriffspunkt Nr.		A	B	
Vortriebsmethode		1	2	
- Schildvariante (bei SM)		SM	SPV	
Länge Bauabschnitt		Mechanisch		
Sicherungsaufwand / Ausbaukonzept		9'000	1'725	
Sicherungsklassen		Tübbing	Leicht	
- SK 1				
- SK 2				
- SK 3				
- SK 4				
- SK 5				
- Summe SK 1 - 5				
Ringspaltstärke	mm	110		
Ausbruchsicherungsstärke	mm		300	
Tübbingstärke	mm	300		
Tübbing Bewehrungsgehalt	kg/m ³	85		85 kg/m ³
Ausbaustärke Innenverkleidung	mm	300	300	
Ausbruchsdurchmesser	mm	11'410	11'190	
Abdichtungskonzept	-	Teilabdichtung	Teilabdichtung	
Mittlere Transportdistanz im Tunnel	km	4.5	0.8	
Transporte		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Transporte zur Baustelle / zum Portal		1	2	
Zement				
- Transportdistanz	km			25 km
- Transportmittel	-			Strasse
Stahl				
- Transportdistanz	km			300 km
- Transportmittel	-			Strasse
Kunststoff / Abdichtungsfolie				
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Kies				
- Transportdistanz	km			40 km
- Transportmittel	-			Strasse
Tübbing				
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Transporte im Tunnel				
Transportmittel - Baumaterialien	-			Pneubetrieb
Transportmittel - Ausbruchsmaterial	-	Förderband		Pneubetrieb
Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Wiederverwertung vor Ort		1	2	
- Terrainveränderung / Auffüllungen	%	5	5	
- Betonzuschlag	%	30	30	
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0	
Abtransport Überschussmaterial				
- Herstellung von Baustoffen	%	0	0	
- Aufschüttungen	%	15	15	
- Deponie	%	50	50	
Summe	%	100	100	
Transporte Materialbewirtschaftung		Angriffspunkt Nr. (Punkte, von denen aus Ausbruch erfolgt)		
Herstellung von Baustoffen		1	2	
- Transportdistanz	km			50 km
- Transportmittel	-			Strasse
Aufschüttungen				
- Transportdistanz	km			20 km
- Transportmittel	-			Strasse
Deponie				
- Transportdistanz	km			40 km
- Transportmittel	-			Strasse

Betriebsdaten

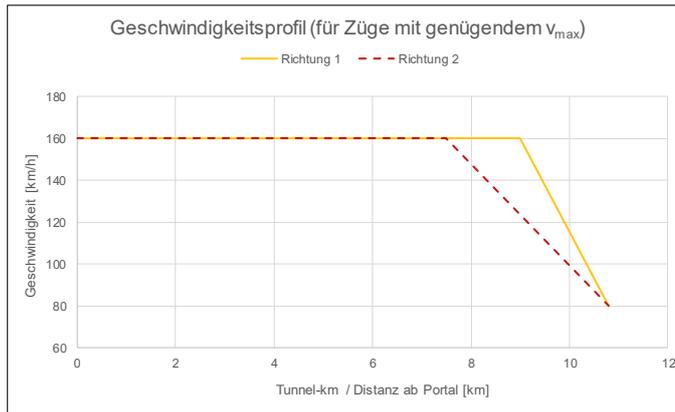
Im Tunnel verkehrende Zugtypen

Zugtyp	-	Giruno	Giruno	FV-Dosto	FV-Dosto	KISS	KISS						
Untertyp (nur bei Güterzügen)	-												
Zuglänge	m	404	202	400	200	300	150						
Richtung 1: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	36	36	18	18						
Richtung 2: mittlere Anzahl Züge/Tag	-	24	12	36	36	18	18						

Geschwindigkeitsprofil

Distanz ab Portal in Richtung 1	km	0	9	10.8			
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	160	80			

Distanz ab Portal in Richtung 2	km	0	7.5	10.8			
(max.) Zuggeschwindigkeit	km/h	160	160	80			



Innendurchmesser		7'990	8'490	8'990	9'490	9'990
h_{sok}		2'475	2'860	3'150	3'400	3'510
total Baukosten	Mio. CHF	362.4	385.8	412.6	441.5	476.3
total Energieverbrauch	GWh	2708.3	2398.2	2219.4	2103.9	2041.3
total Treibhausgasemissionen	CO2 t eq	132'577	135'560	141'478	148'784	160'169
Gesamtkosten	Mio. CHF	509.1	517.0	535.3	558.9	591.5

A8 Liste der zwischen 2000 und 2020 in Betrieb gegangenen Bahntunnel (Normalspurnetz)

Nachfolgend sind die Bahntunnel im Normalspurnetz aufgeführt, die zwischen Januar 2000 und Dezember 2020 in der Schweiz in Betrieb gegangen sind. Es besteht keine Gewähr auf Vollständigkeit; die längeren Tunnel dürften aber recht vollständig erfasst sein. Nicht aufgeführt sind kürzere Tunnel (z.B. aus dem Projekt CEVA).

Name	Eröffnungsjahr	Länge [km]	System	Querschnittsfläche [m ²]		vmax [km/h]	Haupt-Bauweise
				Ausbruch	F _{ae}		
Adler	2000	5.3	DS	124		160	TBM mit Schild
Zürcherberg Basistunnel I	2004	9.4	DS	118		160	TBM Mixschild
Murgenthal	2004	4.745	DS	107		200	TBM mit Schild
Varen / Varonne	2004	2.756	DS	88		160	Sprengvortrieb
Önzberg	2004	3.173	DS	119		200	TBM mit Schild
Lötschberg-Basistunnel	2007	34.6	ES	62-65		250	TBM/Spreng
Engstlige	2007	2.6	ES	(Kastenquerschnitt)			Tagbau
Weinberg (DML)	2014	4.8	DS	99	ca. 54	120	TBM
Gotthard-Basistunnel	2016	57	ES	72	46	250	TBM
Blessberg	2017	8.314	DS	ca. 130	92	300	Sprengvortrieb
Rosshäusern (BLS)	2018	2.1	DS	118		160 (200)	Sprengvortrieb
Eppenberg	2020	3.114	DS	127.7	66	160	TBM Mixschild
Ceneri-Basistunnel	2020	22.6	ES	60.3-77.9 (Hufeisenprofil)	41	250	Sprengvortrieb
Bözbergtunnel	2020	2.7	DS	120		125	TBM

Tabelle 32: Normalspurtunnel