

**Bachelorarbeit**

**Bahninfrastrukturausbau und  
Strassenverkehr: Eine Synthetic Control  
Method-basierte Fallanalyse des  
Gotthardbasistunnel**

im Studiengang Bachelor of Science in  
Economics and Data Science in Mobility

**HSLU** Hochschule  
Luzern

vorgelegt von Ann Hesse

am 31.05.2025

Auftraggeber: Robin Carrard

SBB AG, Basel

Referat: (Prof. Dr.) Widar von Arx

## **Abstract**

Diese Bachelorarbeit untersucht die Auswirkungen der Eröffnung des Gotthard-Basistunnels (GBT) auf den Strassenverkehr in der Schweiz. Die zentrale Forschungsfrage lautet, inwieweit eine verbesserte Infrastruktur, konkret der GBT, zu Veränderungen in der Verkehrsnachfrage auf den Strassen führt. Basierend auf der Synthetic Control Method (SCM) analysiert die Arbeit die Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsträgern Strasse und Schiene und formuliert zwei Hypothesen: Erstens, dass der Ausbau der Zuginfrastruktur zu einer signifikanten Steigerung der Fahrgastzahlen im Schienenverkehr führt; zweitens, dass sich die Verkehrszahlen auf der Autobahn im Vergleich zu einem Kontrollsample ohne Ausbau der Zuginfrastruktur verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass der GBT tatsächlich einen positiven Effekt auf den Schienenverkehr hatte, jedoch der Rückgang im Autoverkehr nicht eindeutig quantifiziert werden konnte. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsträgern und weisen auf die Notwendigkeit weiterer Forschung hin, insbesondere im Hinblick auf die langfristigen Effekte und die Segmentierung der Verkehrsteilnehmer. Die Arbeit liefert wertvolle Einsichten für zukünftige infrastrukturelle Interventionen und deren Evaluation im Verkehrssektor.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Relevanz .....	1
1.2. Forschungsfrage.....	2
1.3. Ziele dieser Arbeit .....	3
<b>2. Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>3</b>
2.1. Allgemeine Forschung zu neuer Zug-Infrastruktur .....	3
2.2. Bahninfrastruktur und dessen Herausforderung.....	4
2.3. Faktoren der Verkehrsmittelwahl .....	4
2.4. Besetzungsgrad Auto .....	5
2.5. Touristischer Verkehr in der Schweiz.....	5
<b>3. Fallbeispiel Gotthardbasistunnel .....</b>	<b>6</b>
3.1. Räumliche Abgrenzung .....	6
3.2. Zeitliche Abgrenzung .....	7
3.3. Änderungen durch den Bau.....	8
3.3.1 Reisezeit.....	8
3.3.2 Frequenz Züge .....	9
3.4. Abgrenzung bisherige Studien.....	9
<b>4. Methodik .....</b>	<b>10</b>
4.1. Datenerhebung .....	10
4.1.1. Frequenz Auto .....	10
4.1.2. Frequenzzahlen Schienenverkehr .....	11
4.2. Einführung in die Differenz-in-Differenz-Methode (DiD) .....	11
4.3. Einführung Synthetic Control Methode (SCM).....	12
4.3.1. Auswahl Beobachtungszählstelle Behandlungseinheit.....	13
4.3.2. Auswahl der Kontrollgruppen.....	13
4.3.3. Implementierung der SCM.....	14
4.4. Monatliche SCM.....	14
4.5. Jährliche SCM .....	14
4.6 Annahmen .....	15
<b>5. Ergebnisse der Analyse .....</b>	<b>16</b>
5.1. Ergebnisse Fahrgastfrequenz Zug .....	16
5.1.1 Diff in Diff Analyse Passagiere Zug.....	17

5.1.2 Kannibalisierung Gotthardbergstrecke .....	17
5.2. Residuenanalyse zur Bewertung der Vergleichsübergänge in der Synthetic Control Method .....	18
5.2.1 Darstellung der Ergebnisse der SCM-Analyse jährlich .....	19
5.3. Ergebnisse der monatlichen SCM-Analyse .....	21
5.3.1 Zusammensetzung der synthetischen Kontrolleinheit .....	21
5.3.2 Darstellung der Ergebnisse der monatlichen SCM-Analyse .....	23
5.4 Vergleich der Schiene mit der Strasse .....	25
5.4.1 Differenz in Differenz Analyse der Verkehrsmittelwahl: Auto versus Zug .....	26
5.5 Modalsplit Gotthardachse .....	27
5.5.1 Methodik und Datengrundlage .....	27
5.5.2 Herkunft der GBT-Passagierzahlen 2019 .....	28
5.5.3 Modalsplit 2019 mit und ohne GBT .....	29
<b>6. Diskussion .....</b>	<b>29</b>
<b>7. Zusammenfassung .....</b>	<b>31</b>
<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>32</b>
<b>Anhang A .....</b>	<b>36</b>
Anhang A1: Tabelle Reisezeit .....	36
Anhang A2: Herkunft Passagierzahlen GBT .....	37
Anhang A3: Modalsplit .....	37
<b>Anhang B .....</b>	<b>38</b>
Anhang B1: Diff in Diff Analyse Passagiere Zug .....	38
Anhang B2: Berechnung Residuen jährliche SCM .....	39
Anhang B3: Berechnung jährliche SCM .....	39
Anhang B4: Diff in Diff Auto Zug .....	42
<b>Anhang C .....</b>	<b>43</b>
Anhang C1 ChatGPT-4 .....	43
Anhang C2 Duden.ch .....	43
Anhang C3 Paper: The Effect of the Gotthard Base Tunnel on Road Traffic: A Synthetic Control Approach .....	43

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Räumliche Eingrenzung Gotthard Note. (Medien   AlpTransit Portal, o. D.).....	7
Abbildung 2: Zeitliche Abgrenzung.....	7
Abbildung 3: Reisezeitveränderung.....	8
Abbildung 4: DiD-Formel aus ChatGPT .....	12
Abbildung 5: SCM-Formel aus ChatGPT .....	13
Abbildung 6: Fahrgastzahlen Schienenverkehr .....	16
Abbildung 7: DTV-Gotthardbergstrecke und GBT .....	17
Abbildung 8: Residuenberechnung jährliche SCM.....	18
Abbildung 9: SCM jährlich.....	19
Abbildung 10: Monatliche Gewichtung der Kontrollpässe.....	22
Abbildung 11: SCM Gotthard monatlich .....	24
Abbildung 12: Vergleich Wachstum Zug vs. Auto .....	26
Abbildung 13: Herkunft Passagiere GBT .....	28
Abbildung 14: Ergebniss diff in diff Analyse Passagiere Zug .....	38
Abbildung 15: Residuen jährliche SCM .....	39
Abbildung 16: Ausgabe jährliche Variante 1 .....	39
Abbildung 17: Ausgabe jährliche SCM Variante 2 .....	40
Abbildung 18: Ausgabe jährliche SCM Variante 3.....	40
Abbildung 19: Ausgabe jährliche SCM Variante 4.....	41
Abbildung 20: Diff in Diff Auto Zug .....	42

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl Züge auf der Gotthard-Achse im Vergleich (Fahrplanarchiv   öv-info.ch, o. D.).....	9
Tabelle 2: Kontrollgruppen SCM .....	13
Tabelle 3: Mittlerer monatlicher Rückgang Autos .....	25
Tabelle 4: Reisezeit Zug und Auto .....	36
Tabelle 5: Herkunft Passagiere GBT .....	37
Tabelle 6: Modalsplit ohne GBT 2019 (Szenario).....	37
Tabelle 7: Modalsplit mit GBT 2019 (Real) .....	37

## 1. Einleitung

In der Vergangenheit hat die Schweiz erhebliche Fortschritte beim Ausbau von Bahninfrastrukturen gemacht. Dies war notwendig, um der steigenden Nachfrage nach Mobilität gerecht zu werden. Das demografische und wirtschaftliche Wachstum spiegelt sich im kontinuierlichen Anstieg des Verkehrsaufkommens wider. Dies führte zur Notwendigkeit der Modernisierung und Erweiterung des Schienennetzes (Bundesamt für Raumentwicklung [ARE], 2021). Dabei stehen die getroffenen Massnahmen weiter im Zusammenhang mit einer zunehmenden Urbanisierung und einem veränderten Mobilitätsbedürfnis. Der Ausbau der Schieneninfrastruktur in der Schweiz ist ein zentraler Bestandteil der nationalen Verkehrsstrategie. Die geografische Lage des Landes als europäisches Transitland sowie die hohen Umweltstandards erfordern eine nachhaltige und effiziente Gestaltung des Verkehrssektors. Der Schienenverkehr spielt dabei eine entscheidende Rolle, um eine umweltfreundliche Alternative zum Strassenverkehr zu bieten und den CO<sub>2</sub>-Ausstoss zu reduzieren (Bundesamt für Verkehr [BAV], 2020). Eines der bedeutendsten Ausbauprojekte war die Umsetzung der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT), die eine effizientere Verbindung zwischen Nord- und Südeuropa ermöglichte. Der Gotthard-Basistunnel, als Herzstück der NEAT, stellt mit einer Länge von 57 km den längsten Eisenbahntunnel der Welt dar und hat den alpenquerenden Schienenverkehr revolutioniert (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2015). Darüber hinaus haben zahlreiche regionale und nationale Ausbauprojekte, wie der ZEB (Zukünftige Entwicklung Bahninfrastruktur), dazu beigetragen, das Angebot zu verbessern und Engpässe im Netz zu beseitigen (Bundesamt für Verkehr BAV). In der Schweiz stehen in den nächsten Jahren diverse grössere Ausbauten in der Bahninfrastruktur an. Ein zentrales Ziel dieser Massnahmen ist die Verlagerung des Verkehrs von der Strasse auf die Schiene, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoss zu senken und die Umweltbelastung zu reduzieren. Der Ausbau der Bahninfrastruktur soll insbesondere Pendlerströme effizienter bewältigen und den öffentlichen Verkehr attraktiver gestalten. Projekte wie der Ausbau des Knotens Zürich und die Verbesserung der Kapazitäten im Regional- und Fernverkehr sind entscheidende Schritte, um mehr Menschen zum Umstieg auf die Bahn zu bewegen (Berset et al., 2018).

### 1.1. Motivation und Relevanz

Der Ausbau der Schieneninfrastruktur ist von grosser gesellschaftlicher, ökologischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Angesichts der Klimaziele der Schweiz, die eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 vorsehen, spielt die Verlagerung des Verkehrs auf die Bahn eine zentrale Rolle (Bundesamt für Umwelt [BAFU], 2021). Der Strassenverkehr ist eine

der Hauptquellen für CO<sub>2</sub>-Emissionen, weshalb eine verstärkte Nutzung der Bahn einen wichtigen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele leisten kann. Darüber hinaus verbessert eine gut ausgebaute Bahninfrastruktur die Lebensqualität der Bevölkerung, indem sie Staus reduziert und die Lärmbelastung in urbanen Gebieten minimiert. Die wirtschaftliche Relevanz zeigt sich in der verbesserten Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen und wirtschaftlichen Zentren, was insbesondere für Pendler von Vorteil ist. Zudem stärkt ein leistungsfähiges Schienennetz den Wirtschaftsstandort Schweiz, indem es effiziente Logistik- und Transportwege für Unternehmen schafft. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wechselwirkung zwischen Bahn- und Strassenverkehr. Es ist essenziell, die Auswirkungen des Bahnausbaus auf den Strassenverkehr genau zu beobachten, um gezielte Anpassungen in zukünftigen Infrastrukturprojekten vornehmen zu können. Nur durch eine ganzheitliche Planung kann gewährleistet werden, dass die gewünschten Effekte, wie die Reduktion des Autoverkehrs und die Entlastung der Strassen, tatsächlich eintreten. Diese Wechselwirkungen müssen bei der weiteren Verkehrsplanung berücksichtigt werden, um eine nachhaltige und effiziente Mobilitätsstrategie für die Schweiz zu entwickeln (ARE, 2021).

Die wachsende Bevölkerung und die zunehmende Bedeutung nachhaltiger Mobilitätskonzepte erfordern eine fortlaufende Investition in den Schienenausbau. Bis 2040 sollen weitere bedeutende Projekte realisiert werden, darunter der Bau des Durchgangsbahnhofs Luzern (DBL), die Kapazitätserweiterungen im Fernverkehr sowie die Stärkung des Schienengüterverkehrs (Berset et al., 2018). Diese Investitionen sind essenziell, um den hohen Standard des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz zu gewährleisten und den Herausforderungen der Zukunft gerecht zu werden.

## **1.2. Forschungsfrage**

Die Arbeit beschäftigt sich damit, wie sich die Eröffnung des GBT auf den Strassenverkehr durch den Gotthard-Strassentunnel ausgewirkt hat. Dabei steht die Frage hier im Zentrum, ob und in welchem Ausmass eine verbesserte Infrastruktur, hier konkret der GBT, zu einer Veränderung der Nachfrage im Strassenverkehr geführt hat. Somit konzentriert sich die Analyse auf die Wechselwirkung zwischen den Verkehrsträgern Strasse und Schiene im Kontext eines konkreten Ausbaus im Schienenverkehr.

**Hypothese 1:** Der Ausbau der Zuginfrastruktur in einer bestimmten Relation führt zu einer signifikant stärkeren Fahrgastentwicklung als im übrigen Fernverkehr der SBB.

**Hypothese 2:** Der Ausbau der Zuginfrastruktur in einer Relation führt zu einer Senkung der Verkehrszahlen auf der Autobahn im Vergleich zu einem Vergleichssample ohne Ausbau der Zuginfrastruktur.

Die obengenannten Forschungsfragen decken verschiedene Aspekte der Angebotselastizität und der Auswirkungen von Infrastrukturausbauten auf den Modal Shift und die Verkehrsströme ab.

### **1.3. Ziele dieser Arbeit**

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, die Auswirkungen von Infrastrukturausbauten im Schienenverkehr auf Verkehrsströme, Angebotselastizität und intermodale Wechselwirkungen empirisch zu untersuchen. Ein zentraler Aspekt ist die Frage, inwiefern Verbesserungen der Schieneninfrastruktur das Nachfrageverhalten beeinflussen und ob sie eine Verlagerung vom Strassen- auf den Schienenverkehr begünstigen. Die empirische Analyse soll quantifizieren, in welchem Umfang ein solcher Ausbau die Nutzung der Bahn erhöht und ob langfristig eine nachhaltige Veränderung der Verkehrsmittelwahl stattfindet. Dabei wird untersucht, wie sich das Passagier- und Frachtaufkommen nach der Inbetriebnahme neuer Infrastrukturmassnahmen verändert, ob es messbare Effekte auf die Nutzung des Strassenverkehrs gibt und welche langfristigen Anpassungen im Mobilitätsverhalten erkennbar sind. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für die Planung künftiger Bahninfrastrukturprojekte dienen, indem sie Entscheidungsträgern datenbasierte Hinweise zur Effizienz und Wirkung solcher Massnahmen liefern.

## **2. Theoretische Grundlagen**

### **2.1. Allgemeine Forschung zu neuer Zug-Infrastruktur**

Die Forschung zu neuer Zug-Infrastruktur konzentriert sich meist auf die Auswirkung von Hochgeschwindigkeitsstrecken auf das Verkehrsverhalten sowie auf die Verlagerung zwischen verschiedenen Verkehrsträgern. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf dem Modal Shift, der Verlagerung von Verkehrsteilnehmern von einem Verkehrsmittel auf ein anderes sowie die Entstehung von induzierter Nachfrage. In Giovoni und Dobruszeks (2013) Übersichtsstudie wird der Effekt der Einführung von Hochgeschwindigkeitszügen in mehreren Ländern Europas und Asiens untersucht. Im mittleren Distanzbereich (200 km bis 800 km) zeigt sich, dass Hochgeschwindigkeitszüge zu einer spürbaren Verlagerung vom Flugzeug auf die Bahn führen. Zudem wird auch festgestellt, dass durch ein besseres Bahnangebot induzierter Verkehr gefördert wird. Besonders bei Personen, welche ohne das neue Angebot nicht gereist wären. Hier dient die Strecke zwischen Madrid und Sevilla in Spanien als ein gutes Beispiel. Nach der Eröffnung der Strecke verlor der Luftverkehr deutlich an

Marktanteilen, dies deutet auf eine Substitution durch die Bahn hin. Gleichzeitig wurde eine Steigerung der Gesamtzahl der Reisen auf der Strecke festgestellt. Dies ist ein Hinweis, dass neben der Verlagerung vom Flugzeug auf die Bahn auch neue Bahnreisende gewonnen wurden. Die Studie zeigt also auf, dass Projekte im Bereich Hochgeschwindigkeitsstrecken einen gesamthaften Einfluss auf die Mobilität haben und nicht nur auf die Konkurrenz zwischen den einzelnen Verkehrsträgern (Givoni & Dobruszkes, 2013).

Auch die Studie von Borsati und Albalate (2021) liefert empirische Belege für den Zusammenhang des Modal Shift mit Hochgeschwindigkeitsstrecken. Die Studie legt im Gegensatz zur Studie von Givoni und Dobruszkes (2013) den Fokus ganz auf den italienischen Verkehrsmarkt. Ihre Untersuchung zeigt auf, dass der Bau von Hochgeschwindigkeitsstrecken besonders in stark befahrenen Korridoren zu einem Rückgang des Personenkraftwagen-Verkehrs führen kann. Hierzu dient die Strecke zwischen Mailand und Bologna als Beispiel. Nach der Eröffnung der Hochgeschwindigkeitsstrecke ging der Anteil des Personenkraftwagen-Verkehrs zurück, während die Bahn einen Zuwachs verzeichnen konnte. Gemäss Borsati und Albalate (2021) hängt der Erfolg von einem Ausbau der Infrastruktur nicht nur vom Ausbau selbst ab, sondern auch von flankierenden Massnahmen wie Fahrpreis, Taktfrequenz, Anschlussmobilität sowie politischen Anreizen. So kommt es gemäss den Autoren vor allem dann zu einer nachhaltigen Verkehrsverlagerung, wenn das Angebot der Bahn in der Praxis konkurrenzfähig ist (Borsati & Albalate, 2021).

## **2.2. Bahninfrastruktur und dessen Herausforderung**

In den nächsten Jahren und Jahrzehnten steht die Schweizer Bahninfrastruktur vor verschiedenen Herausforderungen. Der kontinuierliche Anstieg des Personen- und Güterverkehrs führt zu einer zunehmenden Belastung des bestehenden Netzes. Auf Grund dessen ist ein weiterer Ausbau wie auch eine Modernisierung der Bahninfrastruktur notwendig, um den zukünftigen Mobilitätsbedürfnissen gerecht zu werden (ARE, 2016). Der begrenzte Raum wie auch die limitierten finanziellen Mittel setzen daher voraus, dass die Wirkung von Projekten möglichst genau berechnet werden kann, um eine Priorisierung der Projekte zu vereinfachen.

## **2.3. Faktoren der Verkehrsmittelwahl**

Welches Verkehrsmittel für eine Reise gewählt wird, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab, die sowohl individueller als auch systemischer Natur sind. In der wissenschaftlichen Literatur der Verkehrsmittelwahl, also dem motorisierten Individualverkehr (MIV) und dem öffentlichen Verkehr (öV), wird insbesondere die Bedeutung von Reisezeit, Komfort und Preis aufgezeigt.

Eine Studie von Axenhausen (2021) zeigt so zum Beispiel auf, dass die Reisezeit einer der wichtigsten Faktoren bei der Verkehrsmittelwahl ist. Eine Erhöhung der Reisezeit vom öV im Vergleich zum MIV führt zu einem signifikanten Rückgang der öV-Nutzung (Axhausen et al., 2001). Um genauer zu sein, liegt laut Litman (2021) die Reisezeitelastizität im Bereich von -0.3 bis -0.6. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung der Reisezeit von 10% zu einem Nachfragerückgang von etwa 3% bis 6% führen kann (Litman, 2021).

Im Bereich Komfort wirkt sich gerade die Umsteigehäufigkeit auf die Wahl des Verkehrsmittels aus. Mehrfaches Umsteigen nehmen viele als negativ wahr, da damit ein erhöhter Zeitaufwand, Unsicherheit und subjektiver Stress verbunden wird (Wardman, 2004).

Neben der Reisezeit und dem Komfort spielt der Preis eine wesentliche Rolle. Die Preiselastizität wird in Studien meist mit -0.2 bis -0.5 angegeben. Das bedeutet, eine Preiserhöhung von 10% kann zu einem Nachfragerückgang von 2% bis 5% führen (Holmgren, 2007). Schaut man sich jedoch beim MIV die Elastizität gegenüber Treibstoffpreisen und Parkgebühren an, fällt diese im Vergleich geringer aus. Dies weist auf eine starke Bindung der Nutzenden an das Auto hin (Goodwin et al., 2004).

## **2.4. Besetzungsgrad Auto**

Als Besetzungsgrad von einem Pkw bezeichnet man die durchschnittliche Anzahl an Personen, welche ein Fahrzeug auf einem bestimmten Weg oder im Rahmen einer bestimmten Wegkategorie gemeinsam nutzen. Er lässt Rückschlüsse auf die Effizienz der Fahrzeugnutzung sowie die Umwelt- und Verkehrsbelastung zu. Der Besetzungsgrad in der Schweiz wird im Rahmen des Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) erhoben, welcher vom Bundesamt für Statistik (BFS) und dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) durchgeführt wird. Gemäss dem MZMV aus dem Jahr 2021 liegt der Besetzungsgrad im Freizeitverkehr bei 1,89 Personen pro Fahrzeug. Damit liegt er höher als der durchschnittliche Besetzungsgrad über alle Zwecke, welcher bei 1.53 Personen liegt. Schaut man sich den Besetzungsgrad im Freizeitbereich genauer an, sieht man, dass dort wie auch bei allen anderen Zwecken, das Fahrzeug meist nur von einer Person benutzt wird. Der touristische Verkehr in der Schweiz spielt eine zentrale Rolle, insbesondere der Gotthardtunnel als Haupttransitstrecke. Weitere Auswertungen in dieser Arbeit stützen sich daher auf einen Besetzungsgrad von 1.89 Personen (BFS & ARE, 2023, S. 51).

## **2.5. Touristischer Verkehr in der Schweiz**

Der touristische Verkehr spielt in der Schweiz eine zentrale Rolle, er unterscheidet sich in mehreren zentralen Aspekten vom Alltagsverkehr. Die

Alltagsmobilität, welche sich durch regelmässige und routinierte Wege wie Arbeits- und Schulwege zeigt, ist gegensätzlich zum touristischen Verkehr, welcher vorwiegend aus Freizeit-, Erholungs-, und Bildungs-Reisezwecken besteht (ARE, 2024). Gemäss dem Bericht Definition touristische Verkehre (DtoV) entfallen 13% der touristischen Verkehrsleistungen in der Schweiz auf den Transitverkehr. Beim Transitverkehr handelt es sich um Reisen, welche die Schweiz lediglich als Durchgangsland auf ihrer Reise zu einem touristischen Ziel im Ausland nutzen. Eine der bekanntesten Transitstrecken in der Schweiz ist der Gotthardtunnel, welcher eine Hauptverbindung zwischen Nord- und Südeuropa darstellt. Diese Form von Verkehr bringt wirtschaftliche Impulse, stellt jedoch eine Herausforderung für die Infrastruktur und das Verkehrssystem dar (ARE, 2024). Bei der Lösung der Herausforderung spielt der öffentliche Verkehr eine zentrale Rolle. In der Schweiz sind touristische Orte gut mit dem öffentlichen Verkehr erschlossen und dieser wird durch diverse Angebote gefördert. Für die Bekämpfung des Transitverkehrs auf der Nord- Südachse stellt die NEAT mit dem GBT eine zentrale Rolle dar. Dank kürzerer Reisezeiten zwischen der Deutschschweiz und dem Tessin soll eine Verlagerung vom touristischen Verkehr von der Strasse auf die Schiene gefördert werden.

### **3. Fallbeispiel Gotthardbasistunnel**

Der GBT ist seit seiner Eröffnung im Juni 2016 mit einer Länge von 57 km der längste Eisenbahntunnel der Welt. Nach rund 17 Jahren Bauzeit verbindet er den Kanton Tessin mit dem Kanton Uri in der Deutschschweiz und ersetzt damit den im Jahr 1882 erstellten alten Gotthardeisenbahntunnel. Als Teil der NEAT zählt er zu den wichtigsten Nord-Süd Verbindungen im Schienenverkehr. Der Tunnel besteht aus zwei parallel verlaufenden, eingleisigen Röhren zwischen Erstfeld im Norden und Bodio im Süden. Die Bauweise erhöht die Sicherheit und Effizienz des Zugverkehrs. Der Tunnel wurde für Geschwindigkeiten bis zu 250 km/h gebaut (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2015).

Der GBT wird als Fallbeispiel gewählt, da seine geografische Lage im Gotthard-Massiv eine ideale Grundlage für eine Untersuchung der Auswirkung von Infrastrukturausbauten auf Verkehrsströme und die Verlagerung von Verkehrsmitteln bildet.

#### **3.1. Räumliche Abgrenzung**

Räumlich grenzt sich der Perimeter auf der Strasse mit dem Beginn des Gotthardstrassentunnels in Göschenen und dem Ende des Tunnels in Airolo ein. Die Anzahl Autos auf dieser Strecke kommt von der automatischen Zählstelle mit der Nummer 150 in Göschenen, welcher den Verkehr in beide Richtungen zählt (ArcGIS Dashboards). Auf der Schiene wird der Perimeter durch den Bahnhof Arth-Goldau | Altdorf im Kanton Uri sowie den Bahnhof

Bellinzona im Kanton Tessin abgegrenzt, da dies die letzten Haltestellen vor | nach dem Gotthard-Basistunnel (GBT) sind. Die Frequenzen im Zug enthalten die Anzahl Passagiere aus beiden Richtungen (SBB AG).

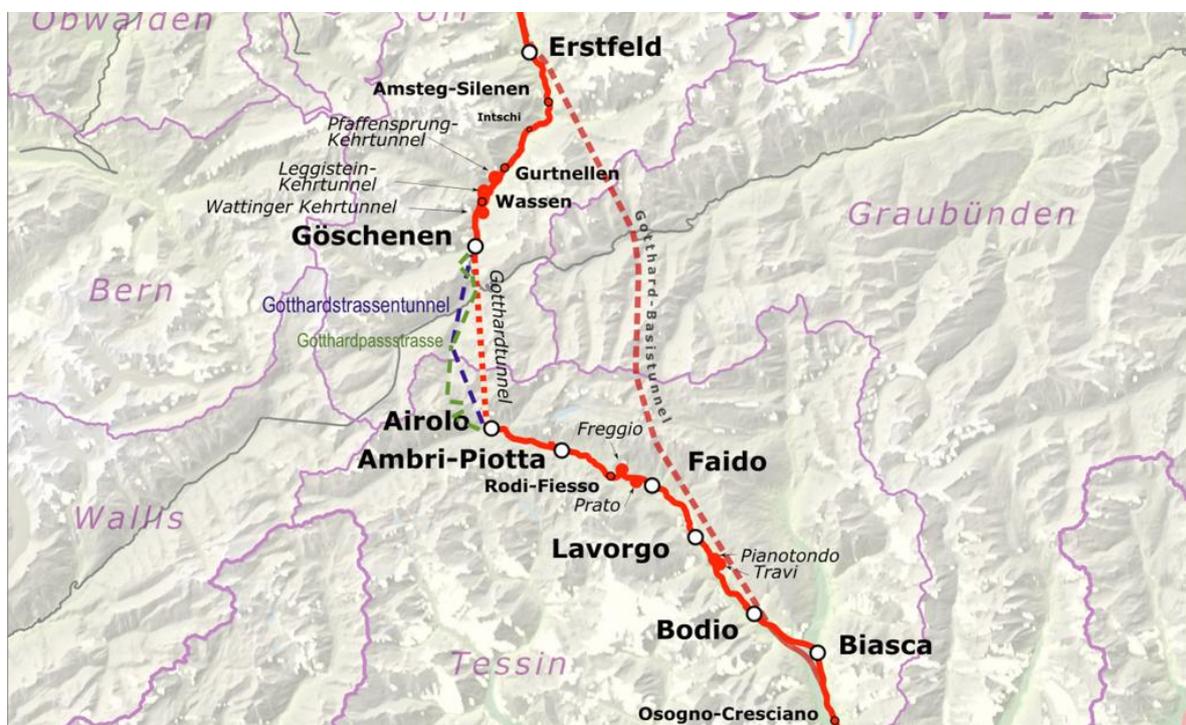


Abbildung 1: Räumliche Eingrenzung Gotthard Note. (Medien | AlpTransit Portal, o. D.)

### 3.2. Zeitliche Abgrenzung

Die Untersuchung durch den Einfluss des GBT beschränkt sich auf den Zeitraum zwischen 2013 bis 2019.

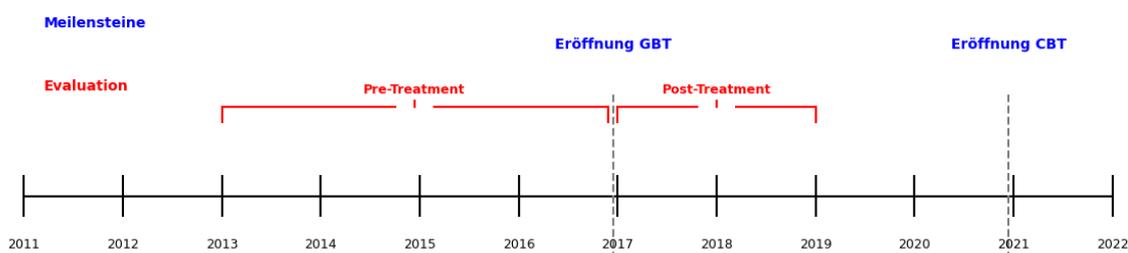


Abbildung 2: Zeitliche Abgrenzung

Als Pre-Treatment Jahre wird der Zeitraum zwischen 2013 und 2016 genommen. Dadurch können bestehende Trends wie auch Verkehrsmuster erkannt werden. Die Referenzjahre sind die Grundlage, um zu analysieren, welche Trends sich nach der Inbetriebnahme des GBT ergeben haben, welche nicht auf bestehende Trends zurückzuführen sind.

Für das Post-Treatment werden die Jahre 2017 bis 2019 genommen. Die Jahre nach der Eröffnung sollen eine mögliche nachweisliche Wechselwirkung aufzeigen und auch ob das Angebot direkt angenommen

wurde. Der Post-Treatment Zeitraum geht nicht länger, da die Covid-19-Pandemie die Analysen verfälschen würde.

### 3.3. Änderungen durch den Bau

Durch den Bau des Tunnels kam es zu beträchtlichen Änderungen so auch in der Anzahl der täglichen Verbindungen auf der Gotthardachse im Schienenverkehr.

#### 3.3.1 Reisezeit

Dank dem Tunnel konnte die Reisezeit mit dem Zug verkürzt werden. Betrachtet man die Reisezeit zwischen Bern, Basel, Zürich HB und Luzern nach Bellinzona der Jahre 2016 und 2019, zeigt sich, dass im Jahr 2019, nach der Eröffnung des GBT, die Fahrzeit um durchschnittlich 23 Minuten<sup>1</sup> reduziert werden konnte.

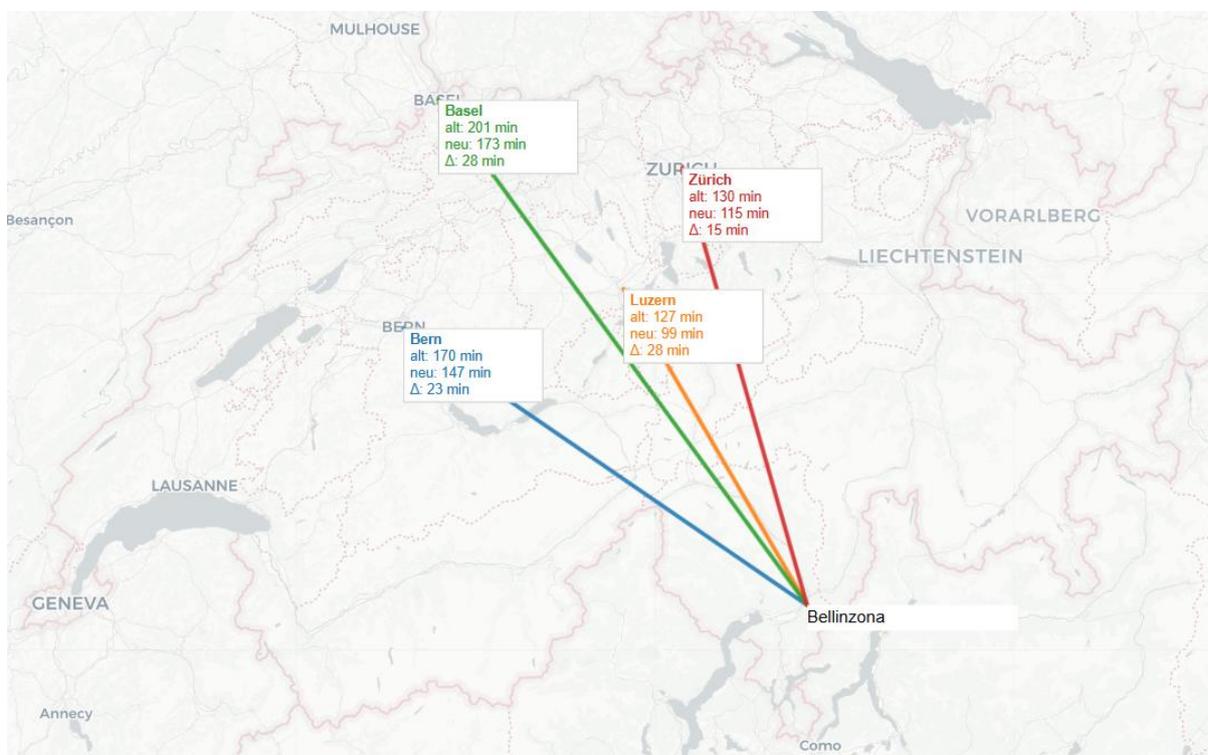


Abbildung 3: Reisezeitveränderung

Um einen Überblick über die Reisezeitverkürzungen zu erhalten, wurde eine Tabelle erstellt. Die Tabelle konzentriert sich dabei auf Verbindungen in verschiedene Tessiner Ortschaften sowie nach Mailand aus den vier grossen Schweizer Städten Bern, Basel, Luzern und Zürich. Zum Vergleich wurde

<sup>1</sup> Vgl. Anhang A1 Tabelle 4

die Fahrzeit mit dem Auto, ohne Stau, herangezogen (vgl. Anhang A1, Tabelle 4).

### 3.3.2 Frequenz Züge

Die allgemeine Annahme, dass die Frequenz der Züge mit der Eröffnung des Tunnels zugenommen hat, ist falsch. Vergleicht man den Fahrplan aus dem Jahr 2016 mit dem des Jahres 2019, sieht man, dass sich die Anzahl der Züge zwischen Arth-Goldau und Bellinzona nicht erheblich geändert hat.

Tabelle 1: Anzahl Züge auf der Gotthard-Achse im Vergleich (Fahrplanarchiv | öv-info.ch, o. D.)

Zugbezeichnung	2016	2019
EC	8	9
IC(n)	16	18
IR	16	0
RE mit Umsteigen Erstfeld	0	14
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>41</b>

Das Bundesamt für Verkehr begründet den Entscheid trotz einer höheren Kapazität die Frequenz nicht auszubauen wie folgt: «Die volle Wirkung des Gotthard-Basistunnels kann erst mit dem Ceneri-Basistunnel (CBT) und dem weiteren Ausbau der Zufahrtsstrecken erreicht werden. Engpässe bestehen insbesondere bei den Zulaufstrecken im Süden (Bellinzona, Lugano) und im Norden (Arth-Goldau)» (Bundesamt für Verkehr [BAV], 2016).

Gemäss dem Monitoring Gotthard-Achse vom Bund (ARE), ging es in einem ersten Schritt um die Beschleunigung der Fernverkehrszüge und weniger um die Erhöhung der Anzahl Züge (Bundesamt für Raumentwicklung [ARE], 2020).

### 3.4. Abgrenzung bisherige Studien

Durch die Eröffnung des GBT kam es zu signifikanten Veränderungen in der Schweizer Verkehrsinfrastruktur. Diese beeinflusste neben dem Verkehrsfluss auch die räumlichen Entwicklungen in der Region. Das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) startete das Projekt Monitoring Gotthard Achse (MGA) mit dem Inhalt einer Infografik, eines Syntheseberichts und einem technischen Bericht als Teil der ARE-Studienreihe «Räumliche Auswirkung von Verkehrsinfrastrukturen». In dem Synthesebericht wird unter anderem auf das Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und den Tourismus eingegangen. Der zentrale Unterschied zwischen der Studie und dieser Arbeit liegt bei der Methodik zur Analyse. Bei der MGA-Analyse wird das Wirkungssystem Tripod angewendet. Dies erfasst verschiedene Einflussfaktoren systematisch. Hingegen basiert die Analyse dieser Arbeit auf der SCM. Durch diese

Methode kann eine detaillierte Untersuchung der Auswirkung isoliert betrachtet werden (ARE, 2022).

Ergänzend dazu gibt es den NEAT-Wirkungsbericht, das Monitoring Verkehr und Umwelt (MVU) sowie die Berichte zum alpenquerenden Verkehr des Bundesamtes für Verkehr. Diese Berichte befassen sich jedoch mit dem generellen Trend der Verlagerung des Verkehrs von der Strasse auf die Schiene und gehen dabei nicht spezifisch auf den GBT ein (Ickert et al., 2019; BAV, 2020). Diese Studie geht über diese aggregierten Studien hinaus und ermöglicht mit der SCM eine gezielte Analyse der spezifischen Auswirkung des GBT auf den Personenverkehr.

## **4. Methodik**

Um Analysen zum Fallbeispiel GBT zu machen, muss zuerst definiert werden, welche Daten gebraucht werden können und wo diese zur Verfügung gestellt werden. Danach werden die Daten zusammengetragen, bereinigt und zur Anwendung der gewählten Methode vorbereitet.

### **4.1. Datenerhebung**

Um die Wahl des Verkehrsmittels analysieren und bewerten zu können, ist es notwendig, relevante Datenquellen zu erfassen. In dieser Arbeit werden sowohl die automatische Verkehrszählung auf der Strasse als auch die Fahrgastfrequenz im Bahnverkehr genutzt.

#### **4.1.1. Frequenz Auto**

Um eine Veränderung im Verkehrsaufkommen vor und nach der Inbetriebnahme des GBT feststellen zu können, werden die Daten von den automatischen Zählstellen vom ASTRA verwendet. Das ASTRA unterhält schweizweit permanente automatische Verkehrszählstationen an rund 330 Standorten auf Nationalstrassen. Für die Erfassung der Autos nutzt die Zählstation in der Fahrbahn integrierte Induktionsschleifen, welche mit Erfassungsgeräten verbunden sind. Mit der Überfahrt eines Autos verändert sich das von Induktionsschleifen erzeugte elektromagnetische Feld. Dies löst die Zählung eines Fahrzeugs aus (ASTRA). Es ermöglicht eine genaue Zählung der Fahrzeuge. Durch die stetige und automatische Erfassung der Daten sind die Verfügbarkeiten hoch. Ein automatisches Abfragesystem überträgt die erfassten Daten täglich und validiert diese als Tages-, Monats- und Jahresdaten. Die vom ASTRA validierten Daten stehen im Internet auf der Website des Bundesamtes frei für jeden zugänglich zur Verfügung. Die Daten sind dort noch einmal in verschiedene Bereiche unterteilt. Zum Beispiel findet man zum einen die Monatsdaten und zum anderen den Jahresdurchschnitt des durchschnittlichen Tagesverkehrs (DTV). Der DTV-Wert zeigt den Mittelwert von 24 Stunden aller Tage. Um nur den Personenverkehr herauszufiltern, konzentrieren sich die Frequenzzahlen auf

die Daten der Autos  $\leq 3.5$  Tonnen. Diese detaillierten und validierten Datengrundlagen helfen bei der Analyse von Veränderungen im Verkehr im Zusammenhang mit Infrastrukturprojekten. Da das ASTRA die Daten auf der Website pro Jahr als Excel zur Verfügung stellt, wird aus vielen einzelnen Excel-Tabellen eine Einzige, mit allen für die Analyse der Arbeit wichtigen Daten, erstellt (ASTRA).

#### **4.1.2. Frequenzzahlen Schienenverkehr**

Da die Frequenzen der Schiene nicht offen im Internet zu finden sind, wurde hierfür die SBB AG angefragt. Die SBB AG nutzt zur Ermittlung der Fahrgastzahlen und Frequenzen auf ihren Strecken sowohl im Regional- als auch im Fernverkehr automatische Fahrgastzählsysteme (AFZ). Die AFZ-Systeme sind in den Zügen der SBB integriert und verwenden Infrarot-Sensoren sowie Kameras, um die Anzahl der ein- und aussteigenden Passagiere zu erfassen. Diese Daten werden in Echtzeit gesammelt und anschliessend anonymisiert und aggregiert ausgewertet. Da nicht alle Züge im Fernverkehr mit dem AFZ ausgestattet sind, wird im Fernverkehr die Frequenz auch vom Zugpersonal in einer dafür erstellten App eingefügt (SBB AG). Um die angefragten Daten zur Verfügung zu stellen, wird die SBB AG die erhobenen und aufbereiteten Informationen in einem Bericht zusammenfassen. Grafiken in diesem Bericht basieren auf allen relevanten Daten zur Fahrgastfrequenz der jeweiligen Strecke. Dabei sind es die monatlichen Durchschnittstageswerte, welche angeschaut werden. Die Daten werden digital als Exceldatei per E-Mail bereitgestellt. Die anonymisierten und aggregierten Daten gewährleisten, dass keine persönlichen Informationen preisgegeben werden.

#### **4.2. Einführung in die Differenz-in-Differenz-Methode (DiD)**

Das Verfahren der Differenz-in-Differenzen-Methode (DiD) ist ein Verfahren, welches in der empirischen Forschung zur Abschätzung kausaler Effekte von einer Intervention oder Ereignissen angewendet wird. Das Konzept hinter der Methode ist, zeitliche Veränderungen eines Outcomes in der Behandlungsgruppe mit der entsprechenden Veränderung der Kontrollgruppe zu vergleichen. Dabei ist die Hauptannahme, dass beide Gruppen ohne Intervention den gleichen zeitlichen Trend aufweisen würden, dies wird auch als Parallelität der Trends bezeichnet. Durch den Vergleich der Differenz vor und nach der Intervention zwischen den Gruppen kann der Effekt der Intervention isoliert und geschätzt werden. Die Methode basiert auf einer einfachen mathematischen Formel (Fredriksson & De Oliveira, 2019).

$$DiD = (Y_{B,nach} - Y_{B,vor}) - (Y_{K,nach} - Y_{K,vor})$$

Abbildung 4: DiD-Formel aus ChatGPT

$Y_{B,nach}$ : Ergebnisvariable der Behandlungsgruppe („B“) nach der Intervention

$Y_{B,vor}$ : Ergebnisvariable der Behandlungsgruppe vor der Intervention

$Y_{K,nach}$ : Ergebnisvariable der Kontrollgruppe („K“) nach der Intervention

$Y_{K,vor}$ : Ergebnisvariable der Kontrollgruppe vor der Intervention

### 4.3. Einführung Synthetic Control Methode (SCM)

Als Methode zum Feststellen der Wechselwirkung wird in dieser Arbeit die SCM angewendet. Sie zählt zu den innovativen statistischen Techniken, welche in der kausalen Inferenz zur Bewertung der Auswirkung einer Intervention oder Massnahme verwendet werden. Sie wird angewendet, wenn randomisierte Kontrollstudien nicht durchführbar sind. Im Bereich wie der Verkehrsinfrastruktur ist sie gut zu nutzen, da es sich bei dem Ausbau des Schienennetzes um einzigartige Grossprojekte handelt, zu welchen keine direkten Vergleichsgruppen existieren. Dabei enthält der methodische Ansatz der SCM mehrere Schritte. Angefangen wird nach der Festlegung der behandelten Region damit, dass ein Pool von möglichen Kontrollregionen festgelegt wird. Diese dürfen im gleichen Zeitrahmen keine vergleichbaren Infrastrukturbauten erfahren haben. Zum Aufbau des Pools beim Fallbeispiel GBT werden die Daten von anderen Alpenübergängen gesammelt. Sobald der Pool vorhanden ist, werden die Daten vor der Intervention genutzt, um eine synthetische Kontrollgruppe zu erstellen. Das Ziel ist es, eine Kombination aus Kontrollregionen zu finden, deren gewichteter Durchschnitt die Eigenschaften der behandelten Region vor der Intervention möglichst genau nachbildet. Mit der Gewichtung bei den Kontrollregionen können die Charakteristika der behandelten Regionen in der Interventionsperiode vor der Massnahme minimiert werden. Je kleiner der Unterschied zwischen der behandelten Region und der synthetischen Kontrollregion ist, desto präziser sind die daraus abgeleiteten Ergebnisse. Sind diese Schritte abgeschlossen und eine Konstruktion besteht, können die Ergebnisse der behandelten Region und der synthetischen Kontrolle in der Interventionsperiode nach der Massnahme verglichen werden. Dieser Unterschied in den Ergebnissen wird der Wirkung der Intervention zugeschrieben (Abadie, Diamond & Hainmueller, 2015).

Die Formel zur Berechnung des Effekts der SCM lautet:

$$\text{Effekt}_t^{\text{SCM}} = Y_{1,t}^{\text{behandelt}} - \sum_{j=2}^{J+1} w_j \cdot Y_{j,t}^{\text{kontrolliert}}$$

Abbildung 5: SCM-Formel aus ChatGPT

$Y_{1,t}^{\text{behandelt}}$ : Der beobachtete Wert der behandelten Region zum Zeitpunkt t

$Y_{j,t}^{\text{kontrolliert}}$ : Der Wert der j-ten Kontrollregion im selben Zeitraum t

$w_j$ : Das Gewicht der jeweiligen Kontrollregion mit  $\sum w_j = 1$  und  $w_j \geq 0$

Somit ist der Effekt die Differenz zwischen der realen Entwicklung der behandelten Region und ihrer synthetischen Kontrolle.

#### 4.3.1. Auswahl Beobachtungszählstelle Behandlungseinheit

Die Erhebung der Anzahl Autos durch den Gotthardstrassentunnel wird von der Zählstelle Gotthard mit der Nummer 150 gemacht. Die Zählstelle ist in Göschenen, es gibt keine Zu- und Abfahrten zwischen der Zählstelle und dem Tunnel. An dieser Zählstelle werden die Autos in beide Fahrtrichtungen gemessen.

#### 4.3.2. Auswahl der Kontrollgruppen

Als Kontrollregion für die Erstellung einer SCM werden in diesem Fallbeispiel Schweizer Alpenübergänge genommen. Zusätzlich werden fünf weitere ausländische Alpenpässe mit einer ähnlichen geografischen Lage wie der Gotthard gewählt.

Tabelle 2: Kontrollgruppen SCM

Alpenübergang	Zählstellen Betreiber	Nummer	Land
Grand-St-Bernard	ASTRA	41	Schweiz
San Bernardino	ASTRA	44	Schweiz
Bernina	ASTRA	634	Schweiz
Julier	ASTRA	258	Schweiz
Flüela	ASTRA	169	Schweiz
Mont-Blanc-Tunnel	GEIE-TMB	-	Frankreich/Italien
Fréjus-Tunnel	Sitaf S.p.A	-	Frankreich/Italien
Brennerautobahn	ASFiNAG	-	Österreich
Tauerntunnel	ASFiNAG	-	Österreich
Karawankentunnel	ASFiNAG	-	Österreich/Slowenien

Von den genannten Pässen werden die Daten vom gleichen Zeithorizont, den Jahren 2013 bis 2016, vor der Eröffnung des GBT und den Jahren 2017 bis 2019 nach der Eröffnung genutzt.

### **4.3.3. Implementierung der SCM**

Die Anwendung der SCM erfolgt vollständig mit der Programmiersprache Python. Dabei werde die gängigsten Datenanalyse- und Visualisierungsbibliotheken genutzt. Die Methode wurde in zwei Varianten angewendet:

- auf monatlicher Ebene (vgl. Kapitel 4.4)
- auf jährlicher Ebene (vgl. Kapitel 4.5)

Diese doppelte Umsetzung dient dazu, sowohl saisonale Effekte zu erfassen als auch robuste Jahrestendenzen zu analysieren.

### **4.4. Monatliche SCM**

Die monatliche Analyse umfasst die Monate April bis Oktober. Jeder Monat wird separat analysiert, um saisonale Effekte erkennen zu können. Das bedeutet, es wurde für jeden Monat eine eigene synthetische Kontrollreihe mit spezifischer Gewichtung berechnet.

Die Ergebnisse werden als Zeitreihenverläufe und Kontrollgruppen-Gewichtung visuell dargestellt. Die Visualisierung dient im Ergebniskapitel zur Interpretation.

Die Analyse wurde mit der Programmiersprache Python in Visual Studio Code durchgeführt. Durch die monatliche Trennung der Daten ist keine gesonderte Berücksichtigung saisonaler Effekte erforderlich. Die Gewichtung entspricht einer nicht-negativen, auf eine normierte Verteilung auf die Kontrollregionen, welche den Pre-Treatment-Zeitraum der Behandlungsgruppe für jeden Monat bestmöglich approximiert. Dies entspricht der klassischen SCM ohne Berücksichtigung saisonaler Residuen.

### **4.5. Jährliche SCM**

Das Ziel der jährlichen Betrachtung ist, langfristige Trends und strukturelle Veränderungen im Verkehrsverhalten zu erkennen. Die jährlichen Daten beschränken sich in dieser Arbeit auf den Zeitraum April bis Oktober. Der Grund dafür liegt in der eingeschränkten Nutzbarkeit vieler Alpenpässen während der Wintermonate. Durch die saisonal bedingte Schliessung von Strassen in Alpenüberquerungen in der Kontrollgruppe könnte es bei einer Vergleichbarkeit über das ganze Jahr hinweg zu einer Verzerrung kommen.

Um auch die saisonalen Verzerrungen von Neben- und Hauptsaison minimieren zu können, wurden vor der Berechnung des jährlichen DTV monatliche Residuen für jede Zählstelle berechnet. Dabei wurde vom beobachteten Verkehrsaufkommen in einem Monat jeweils der

durchschnittliche Monatswert aus der Prä-Interventionsperiode (2013 bis 2016) subtrahiert. Anschliessend wurden die monatlichen Residuen für jedes Jahr gemittelt, um die Jahreskennzahl der Abweichung vom typischen saisonalen Muster zu erhalten. Diese Residualreihe bildet somit jahrgangsspezifische Abweichungen von den saisonalen Mustern ab und erlaubt klare Vergleiche über die Jahre hinweg. Die Residualreihe ist die Basis für die jährliche SCM. Wie bei der monatlichen Analyse wird eine optimierte Gewichtung der Kontrollgruppen mit  $cvxpy$  berechnet, damit eine möglichst präzise synthetische Kontrollreihe erstellt werden kann.

## **4.6 Annahmen**

Das Anwenden der SCM basiert auf mehreren Annahmen, welche erfüllt sein müssen, um eine Interpretation der Ergebnisse zu erlauben. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Annahmen berücksichtigt:

### **Annahme 1: Keine Antizipation der Intervention**

Die Annahme ist dann erfüllt, wenn sich das Verkehrsverhalten vom Gotthardstrassentunnel nicht schon vor der Eröffnung des GBT aufgrund von Erwartungen oder Planungen verändert hat.

### **Annahme 2: Verfügbarkeit einer geeigneten Vergleichsgruppe**

Gewählte Kontrollpässe müssen eine ausreichende Ähnlichkeit mit dem Gotthard aufweisen. Dies insbesondere im Hinblick auf geografische Lage, Funktion im Verkehrsnetz und saisonalen Mustern.

### **Annahme 3: Convex hull condition**

Vor der Intervention darf die Verkehrsfrequenz am Gotthard im Vergleich zu den Kontrollgruppen weder besonders niedrig noch besonders hoch sein. Das bedeutet, dass die Werte des Gotthards innerhalb des Wertebereichs der Kontrollgruppen liegen müssen.

### **Annahme 4: Keinen Spillover-Effekt**

Es wird davon ausgegangen, dass die Eröffnung des GBT keinen Spillover-Effekt auf andere Alpenübergänge hat. Das bedeutet, dass die Eröffnung wie auch die Nutzung des GBT keine messbaren Auswirkungen, wie etwa auf die Verkehrslage von benachbarten alpinen Routen hat.

### **Annahme 5: Keine externen Schocks während des Beobachtungszeitraum**

In der Zeitspanne des Beobachtungszeitraums (2013 bis 2019) dürfen keine aussergewöhnlichen Ereignisse oder regionalen Vorkommnisse eingetreten sein, welche den Verkehr nur an bestimmten Übergängen beeinflussen. Dazu gehören Naturkatastrophen, Sperrungen oder politische Massnahmen.

## 5. Ergebnisse der Analyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der quantitativen Untersuchung vorgestellt, welche mithilfe der SCM durchgeführt wurden. Die Ergebnisse werden getrennt nach monatlicher und jährlicher Analyse dargestellt und interpretiert. Ein kurzer methodischer Bezug zur Einleitung jedes Abschnitts ermöglicht die Kontextualisierung, ohne methodische Details zu wiederholen.

### 5.1. Ergebnisse Fahrgastfrequenz Zug

In folgender Abbildung ist die Veränderung der Fahrgastzahlen im Schienenverkehr durch den GBT, sowie gesamtschweizerisch dargestellt. Dabei wird das Wachstum im Verhältnis zum Indexjahr 2013 genommen.

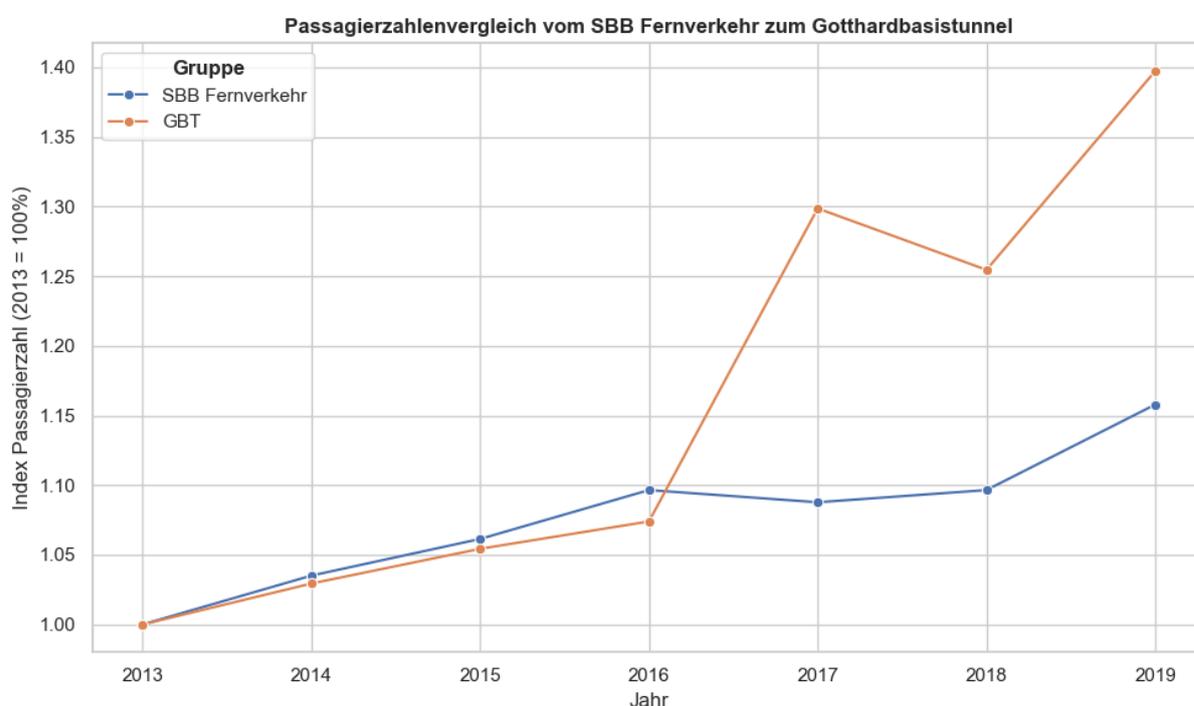


Abbildung 6: Fahrgastzahlen Schienenverkehr

#### Interpretation

- Zwischen den Jahren 2013 bis 2016 steigt das Wachstum auf der Gotthardachse im Vergleich zu den allgemeinen Passagierzahlen gleichmässig.

- Ein klarer Anstieg in der Fahrgastfrequenz auf der Gotthardstrecke auf das Jahr 2017 ist zu beobachten. Dieser Anstieg lässt sich auf das durch den GBT verbesserte Angebot zurückführen.

### 5.1.1 Diff in Diff Analyse Passagiere Zug

Zur quantitativen Abschätzung des Effekts, wurde mit einer Diff in Diff Analyse überprüft, ob sich die Gotthardachse nach der Inbetriebnahme des GBT im Vergleich zum Fernverkehr signifikant verändert hat.

Der did-coef beträgt bei dieser Berechnung 21.25, was zeigt, dass die Gotthardachse nach der Eröffnung des GBT im Durchschnitt 21 Prozentpunkte mehr Wachstum verzeichnet hat als der restliche Fernverkehr. Mit einem P-Wert von 0.002 wird der DiD-Effekt als statistisch signifikant gekennzeichnet. Das heisst, es gibt eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Anstieg auf der Gotthardachse nicht zufällig ist, sondern durch eine Intervention im Jahr 2017 (GBT) verursacht wurde (vgl. Anhang B1, Abbildung 14).

### 5.1.2 Kannibalisierung Gotthardbergstrecke

Durch die Eröffnung des GBT mit dem Fahrplanwechsel 2016/2017 gab es eine grundlegende Änderung auf der Nord-Süd-Achse im Schienenverkehr. Eine direkte Folge der Eröffnung des GBT ist die Kannibalisierung der alten Bergstrecke. Darunter ist der Bedeutungsverlust der alten Gotthardbergstrecke zu verstehen, welche über Jahrzehnte als Hauptverbindung über die Alpen diente.

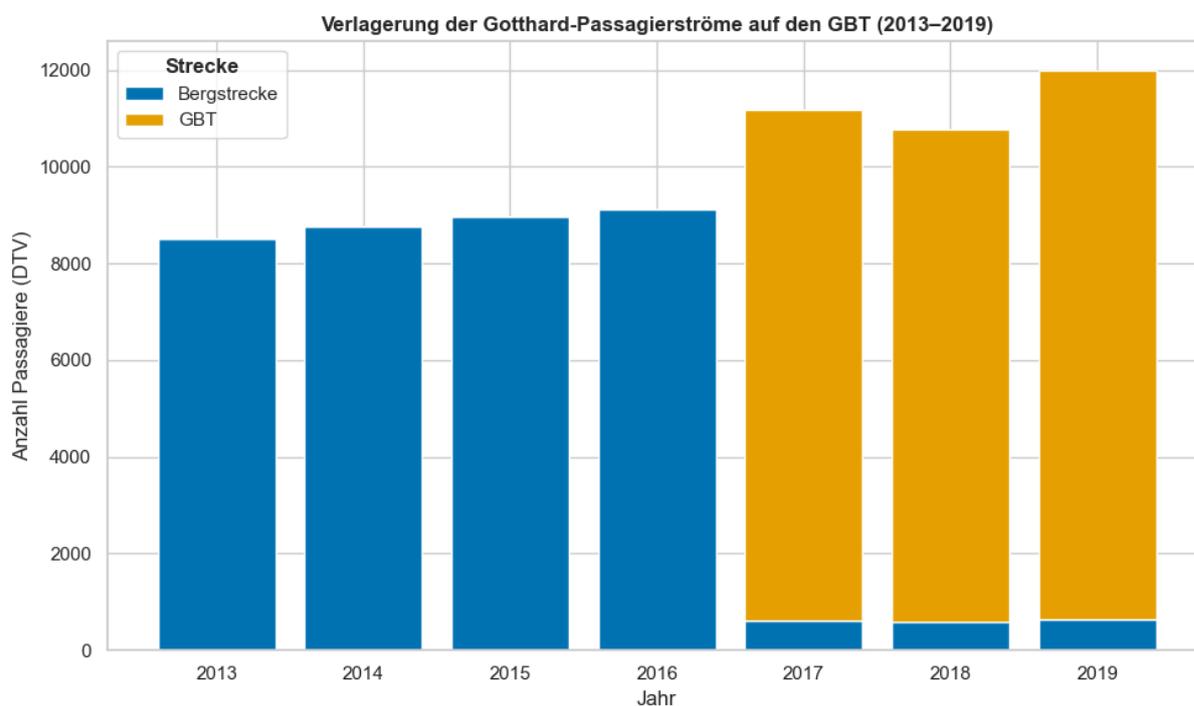


Abbildung 7: DTV-Gotthardbergstrecke und GBT

Die Verlagerung der Passagiere auf die neue Verbindung durch den GBT zeigt sich anhand der Veränderung in der Nutzung beider Strecken. Bis ins Jahr 2016 gingen alle Passagiere über die Bergstrecke, 2017 verschiebt sich der grösste Teil der Passagiere auf die Basistunnelstrecke. Für die

Veranschaulichung dieser Entwicklung zeigt die Abbildung 7 die Gesamtzahl der Passagiere von beiden Strecken im Zeitverlauf. Die Abbildung zeigt klar den abrupten Rückgang auf der Bergstrecke ab 2017.

Mit der Übernahme der nahezu gesamten Passagiere vom GBT verliert die Bergstrecke ihre frühere Funktion als Hauptachse. Trotz des Umstiegs der meisten Passagiere auf den GBT, ist die Frequenz der Züge im Gesamtnetz nicht gestiegen (vgl. Kapitel 3.3.2, Tabelle 1). Stattdessen wurden alle Schnellverbindungen (EuroCity-Züge und InterCity-Züge) vollständig in den GBT verlegt. Über die Bergstrecke verkehren seit der Eröffnung des GBT die früheren InterRegio-Züge als RegioExpress-Züge mit Halt an Zwischenbahnhöfen.

## 5.2. Residuenanalyse zur Bewertung der Vergleichsübergänge in der Synthetic Control Method

Die folgende Analyse basiert auf der Anwendung der SCM sauf Jahresbasis, wobei jeweils die durchschnittlichen Residuen der Monate April bis Oktober herangezogen wurden (vgl. Kapitel 4.5). In der untenstehenden Grafik ist gut zu sehen, dass nicht alle gewählten Übergänge eine Ähnlichkeit zum Gotthard haben. So fallen der Tauerntunnel, die Brennerautobahn wie auch der Karawankentunnel negativ auf, da sich die drei Pässe beim Verlauf der Veränderung der Residuen eindeutig von den anderen Pässen wie auch vom Gotthard abheben. Um von diesen Übergängen keine Verzerrung zu erhalten, werden sie für die SCM nicht weiter berücksichtigt (vgl. Anhang B2 Abbildung 15).

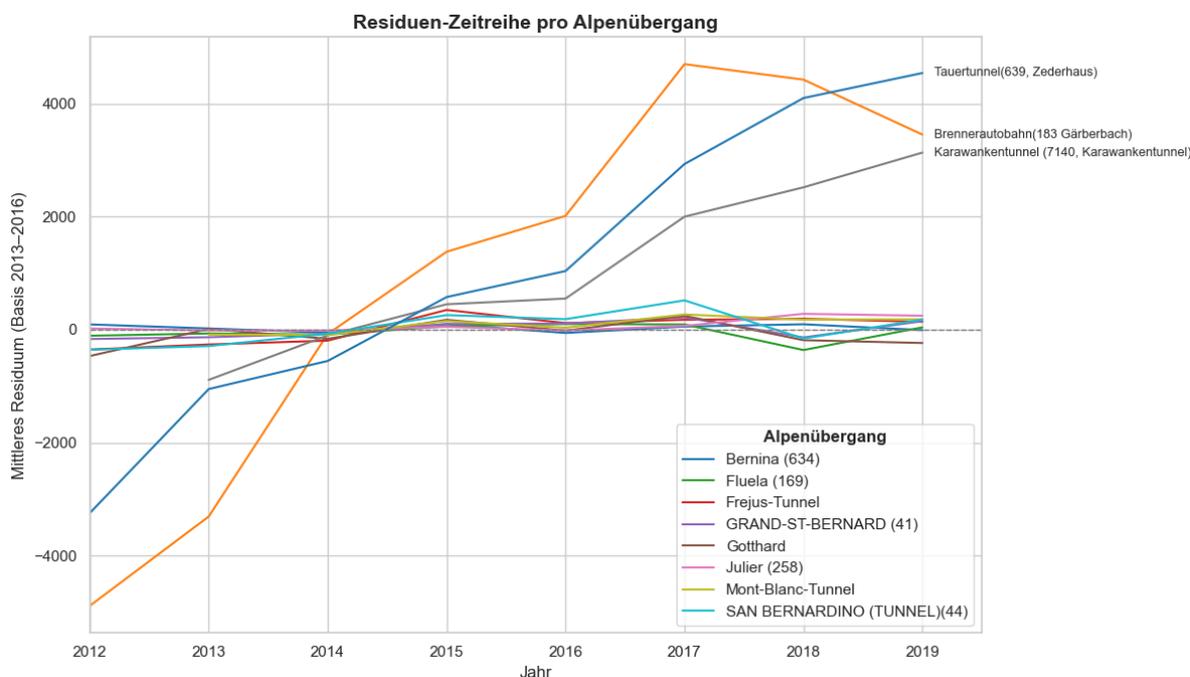


Abbildung 8: Residuenberechnung jährliche SCM

### 5.2.1 Darstellung der Ergebnisse der SCM-Analyse jährlich

In der nachfolgenden Abbildung ist die jährliche Entwicklung der Verkehrsresiduen für den realen Gotthard im Vergleich zum synthetischen Gotthard, basierend auf der synthetischen Kontrollgruppe dargestellt. Die vertikal gestrichelte Linie markiert Ende 2016 den Zeitpunkt, in dem der GBT in Betrieb genommen wurde.

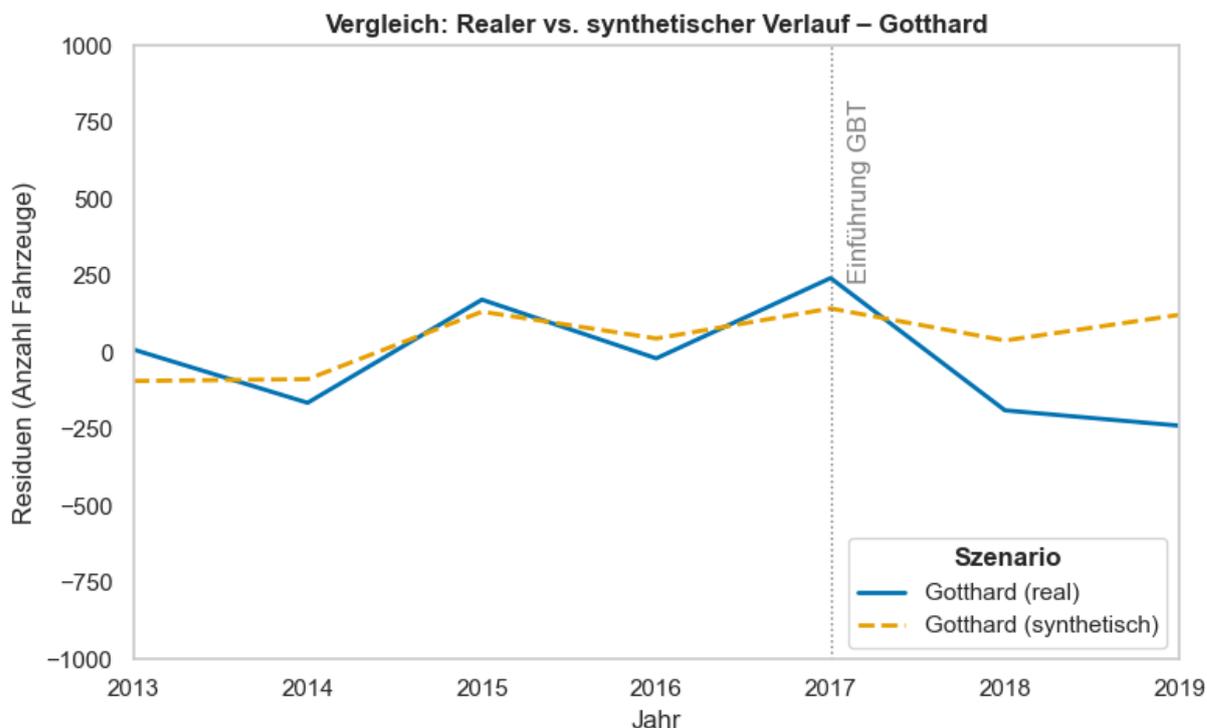


Abbildung 9: SCM jährlich

#### Interpretation Grafik

- Der Unterschied zu Beginn der Analyse im Jahr 2013 lässt sich anhand der Grafik der Residuen erklären. Der Gotthard hat im Vergleich zu allen anderen Pässen im Jahr 2013 den höchsten Wert.
- Der parallellaufende Verlauf der beiden Linien bis ins Jahr 2016 weist auf eine gute Passung des Modells auf die Vorperiode hin.
- Nach der Intervention zeigt sich im realen Gotthard ein negativer Trend, im Gegensatz dazu zeigt der synthetische Gotthard ein konstantes Niveau.

#### Interpretation Ergebnisse

Das Ergebnis zeigt, dass nach der Inbetriebnahme des GBT die tägliche Fahrzeuganzahl im Durchschnitt um 164 niedriger lag als im Szenario ohne GBT. Unter Einbezug des DTV von 16'365 Fahrzeugen im Jahr 2016 entspricht dies einem Rückgang von rund 1%. Der zugehörige 95%-Bootstrap-Konfidenzintervall beträgt [-265; -89], was eine statistisch signifikante Reduktion belegt. Zusätzlich wurde der Effekt auch mit der

Synthetic Difference-in-Differences Methode geschätzt. Dabei kam die Analyse auf einen durchschnittlichen Rückgang von 152 Fahrzeugen pro Tag, mit einem entsprechenden 95%-Konfidenzintervall von [-291; -84]. Der Effekt ist etwas geringer negativ, jedoch im gleichen Grössenbereich und zeigt einen negativen Effekt auch in einem alternativen methodischen Ansatz.

### **Sensitivitätsanalyse**

Um die Robustheit der Hauptergebnisse zu überprüfen und potenzielle Verzerrungen durch Modellannahmen oder externe Einflüsse auszuschließen, wurden zwei ergänzende Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die erste Analyse konzentriert sich auf mögliche Spillover-Effekte, die durch den Gotthard-Basistunnel auf benachbarte Alpenübergänge – insbesondere den San-Bernardino-Tunnel – entstanden sein könnten. Die zweite Analyse basiert auf einer alternativen Zusammensetzung der Kontrollgruppe, wobei ausschließlich Routen innerhalb der Schweiz berücksichtigt wurden. Beide Ansätze dienen dazu, die Ergebnisse der synthetischen Kontrollmethode unter veränderten Rahmenbedingungen zu testen und deren Aussagekraft kritisch zu hinterfragen.

Eine zentrale Annahme (Annahme 4) geht davon aus, dass der Gotthard-Basistunnel keine Spillover-Effekte auf andere Alpenübergänge ausübt. In der Realität ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich das Verkehrsverhalten durch eine Entlastung der Gotthardstrecke verändert. So könnte etwa eine Reisende auf dem Weg von Hamburg nach Mailand ihre Routenwahl davon abhängig machen, wo mit weniger Stau zu rechnen ist. Ein Beispiel vom 30. April 2025 um 23:00 Uhr zeigt, dass laut Google Maps die Fahrzeit über den Gotthard 11 Stunden und 57 Minuten beträgt, während die Route über den San-Bernardino-Tunnel mit 11 Stunden und 48 Minuten nur unwesentlich kürzer ist. Die beiden Routen sind also hinsichtlich der Reisedauer nahezu gleichwertig. Während der Hauptverkehrszeiten könnte jedoch die Gotthardroute durch den neuen Basistunnel spürbar entlastet sein, was dazu führt, dass Reisende vermehrt auf diese Strecke zurückgreifen und auf eine Ausweichroute wie den San-Bernardino verzichten. Um solche möglichen Spillover-Effekte auszuschließen, wurde der San-Bernardino-Tunnel in dieser ersten Sensitivitätsanalyse explizit aus der Kontrollgruppe entfernt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass der Gotthard-Basistunnel zu einem durchschnittlichen Rückgang von 253 Fahrzeugen pro Tag geführt hat. Dies entspricht einer Reduktion von etwa 1,5% im Vergleich zum durchschnittlichen Verkehrsaufkommen vor der Inbetriebnahme des Tunnels. Der geschätzte Effekt ist damit leicht negativer als in der ursprünglichen Hauptanalyse. Das zugehörige 95%-Bootstrap-

Konfidenzintervall liegt bei  $[-266; -107]$  und weist damit erneut eine statistisch signifikante Reduktion auf dem konventionellen 5%-Niveau aus.

Die zweite Sensitivitätsanalyse zielt darauf ab, mögliche Effekte des Gotthard-Basistunnels auf den inländischen Freizeitverkehr zu untersuchen. Dabei wird eine alternative Kontrollgruppe verwendet, die ausschließlich aus Strecken innerhalb der Schweiz besteht. Dies steht im Zusammenhang mit Annahme 2, wonach die Vergleichseinheiten ausreichend ähnlich zur Gotthardstrecke sein sollten. Für diese Analyse wurden Verkehrszählstellen an folgenden Routen berücksichtigt: Alpnachstad, Erstfeld, Flüela, Gondo, Gstaad, Hinterrhein, Schattdorf und Tamis. Die Auswahl erfolgte mit dem Ziel, alternative Strecken zu identifizieren, die im Hinblick auf saisonale Schwankungen, Topografie und Verkehrsmuster eine gewisse Vergleichbarkeit mit der Gotthardroute aufweisen, ohne selbst Teil der grenzüberschreitenden Transitachsen zu sein. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verkehrsverläufe der realen Gotthardstrecke und ihres synthetischen Gegenstücks in der Vorperiode eng beieinanderliegen, was auf eine gute Passgenauigkeit des Modells hinweist. Nach der Inbetriebnahme des Basistunnels ergibt sich ein durchschnittlicher Rückgang von 610 Fahrzeugen pro Tag. Dies entspricht einem Rückgang von etwa 5% im Vergleich zum Jahresmittel 2016, das bei rund 13'200 Fahrzeugen lag. Der beobachtete Effekt ist damit deutlich stärker negativ als in der vorherigen Sensitivitätsanalyse. Allerdings liegt das 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervall bei  $[-787; 2'081]$ , sodass der Effekt statistisch nicht signifikant ist. Da das Intervall auch den Wert Null umfasst, ist die Aussagekraft dieser Schätzung begrenzt, und die Ergebnisse sollten mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden.

### **5.3. Ergebnisse der monatlichen SCM-Analyse**

Die folgende Analyse basiert auf der Anwendung der SCM auf Monatsbasis (vgl. Kapitel 4.4). Zur Abbildung von Neben- und Hauptverkehrsmonaten wurden die Monate April bis Oktober gewählt.

#### **5.3.1 Zusammensetzung der synthetischen Kontrolleinheit**

In der Abbildung dieses Kapitels sind die monatlich berechneten Gewichte der Kontrollpässe dargestellt, die zur Erstellung der jeweiligen synthetischen Kontrollgruppe dienten. Die starke monatliche Variation deutet auf unterschiedliche saisonale Verkehrscharakteristika hin.

Monatliche Gewichte der Kontrollpässe für den Gotthardstrassentunnel

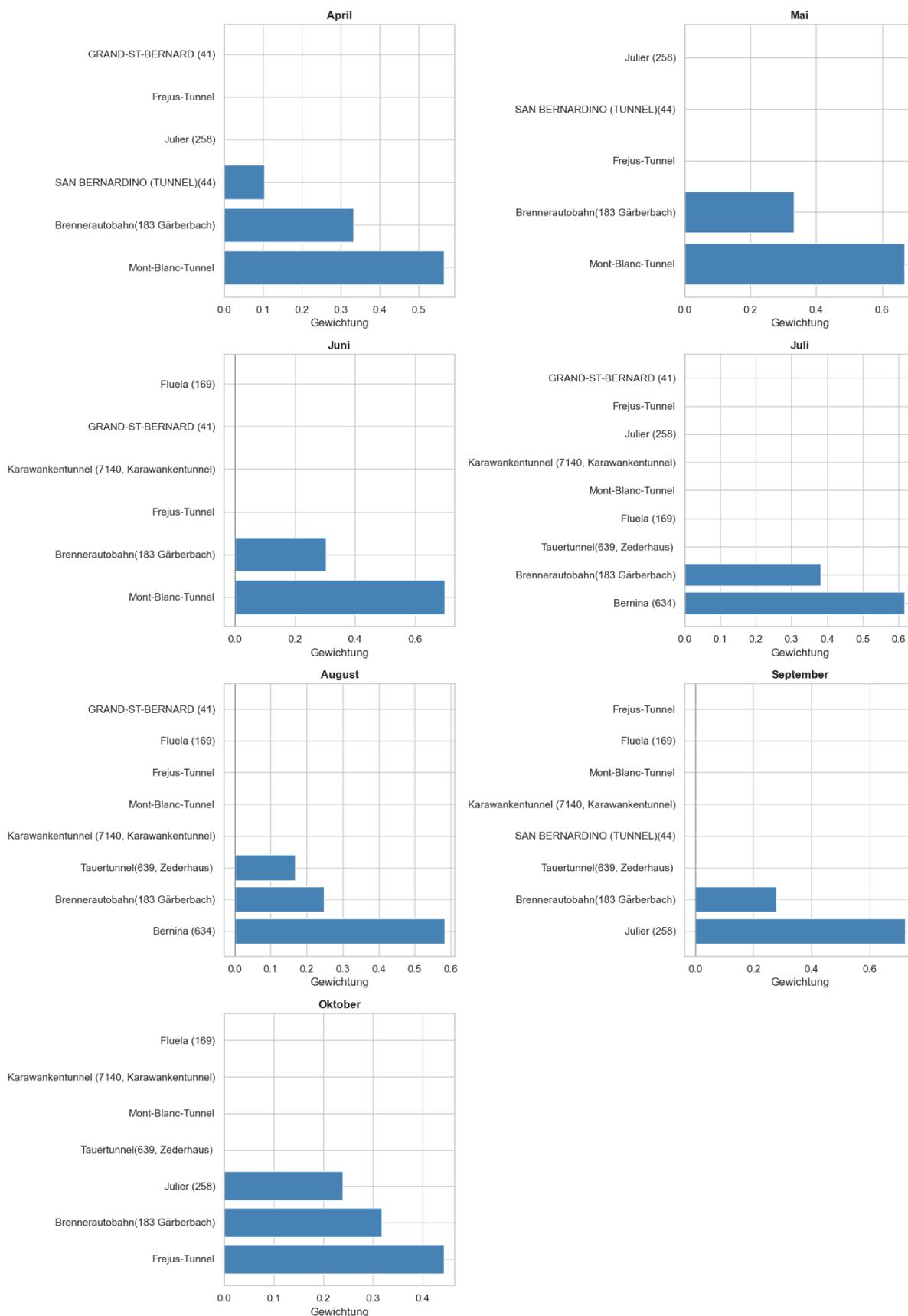


Abbildung 10: Monatliche Gewichtung der Kontrollpässe

### **Interpretation Grafik**

- Der Mont-Blanc-Tunnel und die Brennerautobahn spielen in mehreren Monaten eine dominante Rolle (beispielsweise April, Mai, Juni).
- In den Hochsommermonaten (Juli und August) wird vermehrt auf den Berninapass zurückgegriffen, was auf ähnliche Ferienverkehrsmuster schliessen lässt.

#### **5.3.2 Darstellung der Ergebnisse der monatlichen SCM-Analyse**

In der folgenden Abbildung ist der zeitliche Verlauf des DTV für den Gotthard (reale Werte) im Vergleich zur synthetischen Kontrollgruppe dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert im Jahr 2016 den Zeitpunkt der Intervention, die Inbetriebnahme des GBT.

Vergleich SCM und realen Werten des Gotthardstrassentunnels (monatlich)

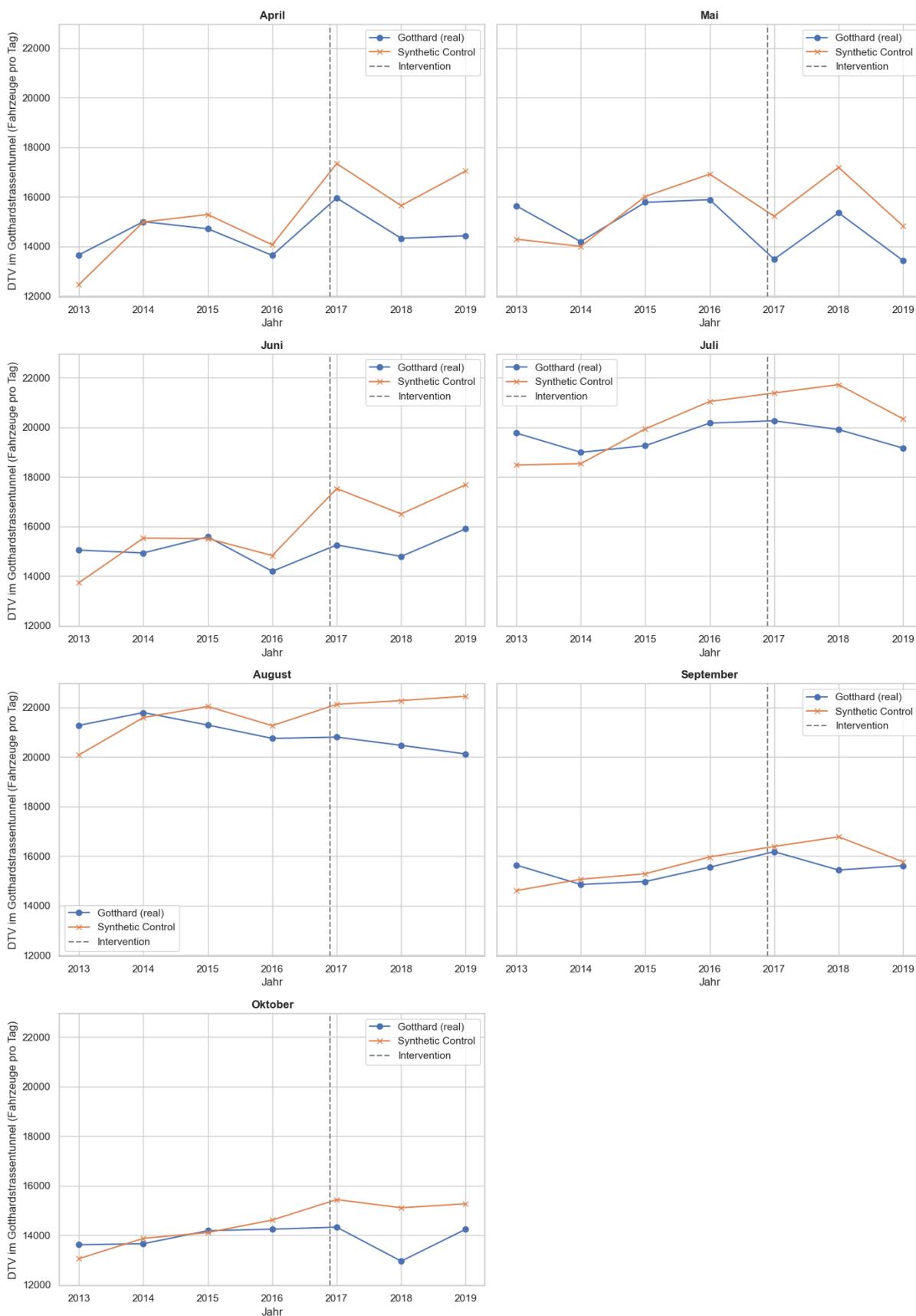


Abbildung 11: SCM Gotthard monatlich

## Interpretation Grafik

- Ein Rückgang oder eine Stagnation des realen Verkehrs im Vergleich zum synthetischen Kontrollscenario kann in nahezu allen Monaten nach 2016 beobachtet werden.
- Im Juli wie auch im August fällt der Unterschied zwischen dem realen Szenario und dem synthetischen Szenario signifikant aus. Während im realen Szenario die Werte sinken oder konstant bleiben, steigen die Werte beim synthetischen Szenario an.
- Im September verlaufen die Kurven der beiden Szenarien nahezu parallel. Diese sehr gute Übereinstimmung kann auf ein Overfitt hinweisen.

## Interpretation Ergebnisse

In der folgenden Tabelle ist zu sehen um wie viel Prozent der Autos Pre-Treatment im Vergleich zum Mittelwert der Autos zurück gegangen ist.

Tabelle 3: Mittlerer monatlicher Rückgang Autos

=== Mittlerer monatlicher Rückgang und %-Anteil am realen Verkehr vor der Intervention			
Monat	Ø Rückgang (Fz)	Ø Real DTV (pre-2017)	% Rückgang
April	-1774.13	14249.75	-12.45
Mai	-1654.94	15370.50	-10.77
Juni	-1921.96	14935.50	-12.87
Juli	-1371.89	19544.50	-7.02
August	-1817.59	21272.25	-8.54
September	-567.72	15253.25	-3.72
Oktober	-1431.17	13927.50	-10.28

Der grosse Unterschied in den Monaten weist auf starke saisonale Schwankungen hin.

## 5.4 Vergleich der Schiene mit der Strasse

Um einen Effekt der Inbetriebnahme des GBT auf der Schiene und der Strasse zu sehen, wird in diesem Kapitel das Wachstum zum Indexjahr 2013 direkt gegenübergestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Frage, ob der GBT zu einer substanziellen Verlagerung des Verkehrs von der Strasse auf die Schiene beigetragen hat.

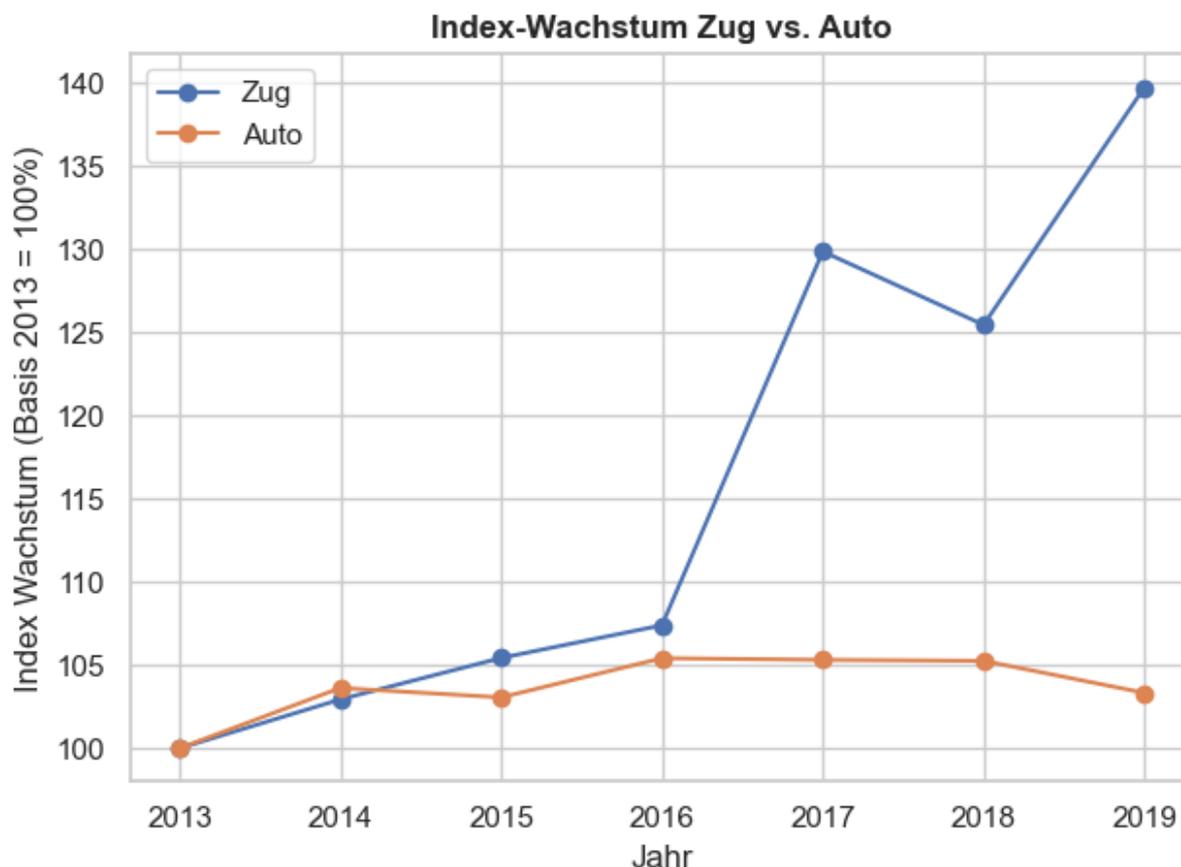


Abbildung 12: Vergleich Wachstum Zug vs. Auto

- Wie in der Grafik zu sehen, steigen die Frequenz auf der Schiene nach der Eröffnung des GBT beträchtlich. Im Gegensatz dazu stagniert das Wachstum bei den Autos.
- Bis 2019 stieg das Wachstum auf der Schiene im Vergleich zum Jahr 2013 um rund 40%. Mit einem leichten Rückgang im Jahr 2019 kommt das Auto auf ein Wachstum von 5%.
- Vergleicht man die Jahre vor der Eröffnung mit den Jahren nach der Eröffnung zeigen sich keine wesentlichen Veränderungen.

#### 5.4.1 Differenz in Differenz Analyse der Verkehrsmittelwahl: Auto versus Zug

Um die Ergebnisse der Abbildung 12 zu untermauern, wurde basierend auf den gleichen Werten eine DiD Auto versus Zug durchgeführt (vgl. Anhang B5, Abbildung 20).

Beim Modell DiD Auto versus Zug wurden drei zentrale Variablen berücksichtigt:

- Treatment: Ein Indikator, der angibt, ob eine Beobachtung zur behandelten Gruppe gehört. 1 für Zug, 0 für Auto.
- Post: Ein Zeitindikator, der angibt, ob die Beobachtung nach der Intervention (also ab dem Jahr 2017) liegt.

- Post Treatment (Interaktionsterm): Das Produkt aus Treatment und Post. Dieser Wert misst den eigentlichen Effekt der Intervention auf die behandelte Gruppe, d. h. ob der Zugverkehr nach 2017 im Vergleich zum Autoverkehr eine signifikante Veränderung aufweist.

Nur unter der Annahme Parallel-Trends kann eine beobachtete Abweichung nach der Intervention auf die Massnahme zurückgeführt werden. Die Annahme kann in diesem Fall so angenommen werden, da der Koeffizient vom Treatment mit 0.749 nicht signifikant ist. Auch der Post-Wert ist mit 0.605 nicht signifikant. Vor der Intervention verlief die Strasse wie die Schiene statistisch gleich.

### **Interpretation**

- Der Koeffizient Post-Treatment zeigt einen Wert von 0.2614, welcher bedeutet, dass nach der GBT-Eröffnung der Zugverkehr um ca. 21.6 Prozentpunkte stärker gewachsen ist als der Autoverkehr.
- Aufgrund des hohen P-Wert bei Post 0.605, was weit grösser als 0.05 ist, kann gesagt werden, dass sich der Autoverkehr nach 2017 nicht signifikant verändert hat. Der leichte Rückgang ist statistisch gesehen nicht bedeutsam, er könnte auch auf Zufall beruhen (vgl. Anhang B5, Abbildung 20).

## **5.5 Modalsplit Gotthardachse**

Um die Auswirkung des GBT auf den Modalsplit entlang der Gotthardachse zu analysieren, werden in diesem Kapitel zwei Vergleichsszenarien angeschaut: Ein Modalsplit mit der Eröffnung des GBT und ein hypothetischer Modalsplit ohne die Eröffnung des GBT. Der Vergleich der beiden Szenarien erlaubt Rückschlüsse auf die Bedeutung des GBT in Bezug auf die Verlagerung vom MIV auf die Schiene und auf induzierten Verkehr im Bahnbereich.

### **5.5.1 Methodik und Datengrundlage**

Als Basisjahr für die Berechnungen wird das Jahr 2016 gewählt, da der GBT erst mit dem Fahrplanwechsel 2016/2017 in Betrieb genommen wurde und es daher im Jahr 2016 noch keine Verlagerungseffekte gab. Auf der Gotthard-Bergstrecke wie auch auf der Strasse blieb der DTV in den Jahren vor 2016 relativ konstant. Daher ist das Jahr 2016 als Referenzzeitpunkt für das Szenario ohne GBT geeignet.

Im Jahr 2016 kann noch kein Verlagerungseffekt innerhalb des Schienenverkehrs vorhanden sein, da der GBT erst auf den Fahrplanwechsel eröffnet wurde. Bei den Autos ist der DTV in den Jahren 2015 und 2016 konstant geblieben. Auch vor 2015 gab es keine grossen Sprünge.

Für die Beurteilung des Modalsplits wird das Jahr 2019 genommen. Es wird davon ausgegangen, dass drei Jahre nach der Eröffnung des GBT sich das

neue Verkehrsregime etabliert hat, das Nutzerverhalten sich konsolidiert hat und die Zahlen weniger volatil sind. Das erlaubt für das Jahr 2019 eine valide und stabile Betrachtung.

### 5.5.2 Herkunft der GBT-Passagierzahlen 2019

Um eine quantitative Einordnung der Veränderung der Passagierzahlen im Schienenverkehr machen zu können, wurde die Herkunft der Passagiere vom GBT im Jahr 2019 differenziert untersucht. Dabei zeigt sich folgende Aufteilung:

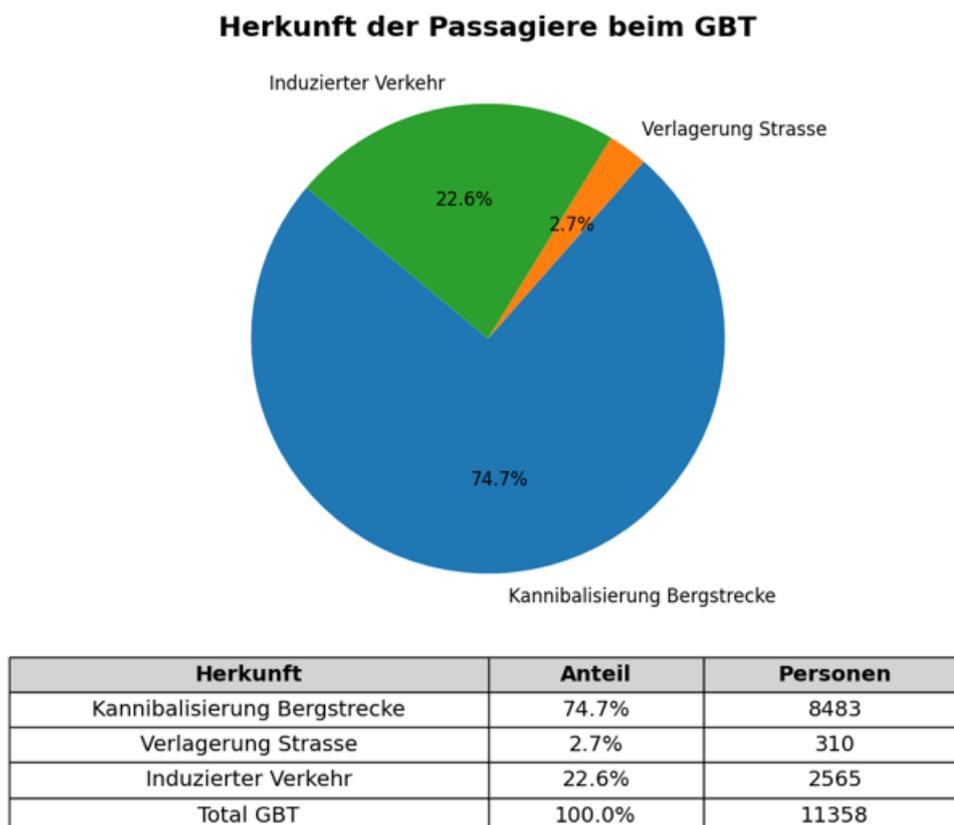
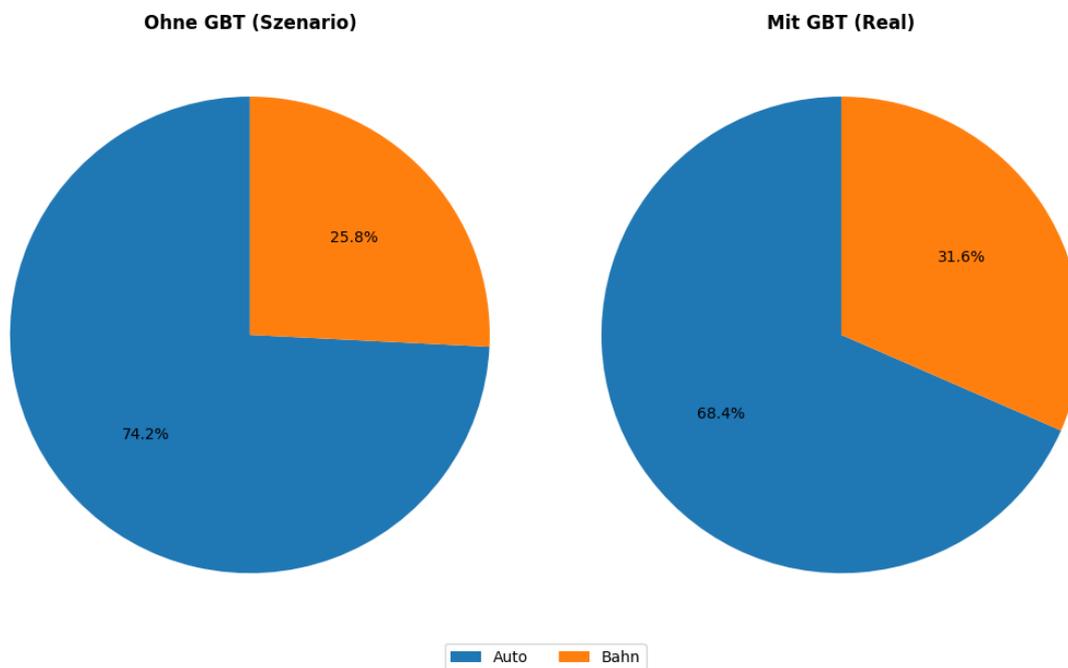


Abbildung 13: Herkunft Passagiere GBT

Die Kannibalisierung der Gotthard-Bergstrecke ist die grösste Veränderung. Von über 10'000 Passagieren pro Tag waren im Jahr 2019 noch 638 Passagiere pro Tag auf der Bergstrecke unterwegs. Die Verlagerung von der Strasse umfasst 310 Personen pro Tag. Diese Anzahl wurde mithilfe der SCM-Analyse jährlich ermittelt. Die rund 22% induzierter Verkehr, also zusätzlicher Verkehr wäre ohne den GBT nicht entstanden.

### 5.5.3 Modalsplit 2019 mit und ohne GBT

Mit den genannten Annahmen als Basis, wurde der Modalsplit für das Jahr 2019 berechnet. Einmal im hypothetischen Fall ohne GBT und einmal im realen Fall mit GBT.



Verkehrsmittel	Anteil Szenario	Personen Szenario	Anteil Real	Personen Real
Auto	74.2%	26292	68.4%	25982
Bahn	25.8%	9133	31.6%	11989
Total	100.0%	35425	100.0%	37971

## Ergebnis und Interpretation

Die Auswertung zeigt auf, dass es eine Verschiebung im Modalsplit auf der Gotthardachse zugunsten der Bahn seit der Eröffnung des GBT gab. Die Bahn hat einen um 4.5% höheren Anteil am Gesamtpersonenverkehr als ohne die Eröffnung vom GBT. Diese Verschiebung lässt sich mit der Verlagerung der Bergstrecke, der Verlagerung von der Strasse wie auch dem induzierten Verkehr erklären.

## 6. Diskussion

In dieser Arbeit wurde analysiert, welche Auswirkung die Eröffnung des GBT auf den Bahnverkehr wie auch auf den Gotthardstrassentunnel hat. Für die Analyse auf den Strassenverkehrstunnel wurde die SCM angewendet. Basierend auf einer gewichteten Kombination alternativer Alpenübergängen in der Schweiz und den Nachbarländern, konnte ein synthetischer Gotthard erstellt werden. Anhand dieses Szenarios wird geschätzt, dass nach der Eröffnung des GBT die Anzahl Fahrzeuge durch den Strassentunnel um 164 Fahrzeuge pro Tag zurück ging. Unter Berücksichtigung des

Besetzungsgrads eines Autos im Freizeitverkehr (vgl. Kapitel 2.4) von 1.89 Personen macht dies eine durchschnittliche Reduktion im Strassenverkehr von 310 Personen aus. Dies ist ein Rückgang von etwa 1% im Vergleich zur Periode vor der Intervention. Obwohl dieses Ergebnis bescheiden ist, weist der Bootstrap-Konfidenzintervall auf eine statistische Signifikanz hin. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Gegensatz zur Studie von Borsati und Albalade (2020), der Bau einer effizienten Bahnhofinfrastruktur, in dem Fall des GBT mit seiner Reisezeiteinsparung, einen Modal Shift Effekt hatte.

Gegenüber der leichten Abnahme auf der Strasse steht der Anstieg der Zugpassagiere zwischen den Jahren 2013 und 2019. Das Wachstum in diesem Zeitraum liegt bei 41% und ist damit höher als das Wachstum des gesamten Fernverkehrs der SBB AG. Das Wachstum ist jedoch deutlich höher als der Rückgang durch den Gotthardstrassentunnel. Berücksichtigt man die Herkunft der Passagiere des GBT sieht man, dass die Mehrheit von der Bergstrecke kommt oder induzierter Verkehr ist (vgl. Kapitel 5.5.2). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass auf einer touristischen Route wie dem Gotthard, Strassen- und Schienenverkehr keine perfekten Substitute sind. Der Ersatz des Autos durch den Zug ist bescheiden, was mit der Literatur übereinstimmt (Givoni und Dobruszkes, 2013).

Der Zug bleibt auch nach der Eröffnung auf vielen Strecken langsamer als das Auto (vgl. Anhang A1, Tabelle 4). Unter Berücksichtigung von Zugangszeiten zum Zug, würde sich dieser Unterschied noch deutlicher zeigen.

Dazu kommt, dass Touristen öfters in Gruppen reisen. In solchen Fällen ist die Reise mit dem Auto oft kosteneffektiver, dies ist insbesondere der Fall, wenn keiner der Reisenden ein Abo für den öffentlichen Verkehr besitzt (beispielsweise Halbtax-Abo). Zudem gibt es im Hinblick auf die Transitreisenden keine direkte Zugverbindung von Deutschland nach Italien über die Gotthardachse.

Das Hauptlimit dieser Arbeit ist der kurze Post-Treatment Zeitraum. Gerade mit der Eröffnung des Ceneri-Basistunnels kam es mit dem Fahrplanwechsel 2021/2022 zu weiteren Reisezeiterparnissen wie auch zu einer Erhöhung der Zugfrequenz. Diese Analyse war aufgrund der Covid-19-Pandemie nicht möglich. Zukünftige Forschungen in diesem Themengebiet sollten darauf abzielen, die langfristigen Effekte von Verbesserungen im Angebot des öffentlichen Verkehrs auf den Strassenverkehr zu untersuchen.

Eine weitere Limitierung der Arbeit ist die nicht Berücksichtigung der Heterogenität des Behandlungseffekts. Es ist möglich, dass verschiedene Gruppen unterschiedlich auf die Intervention reagieren. Beispielsweise zeigen Blättler, Wallimann und von Arx (2024), dass in der Schweiz inländische Touristen, die in ihrem täglichen Leben regelmässig multimodal

reisen, empfindlicher auf Anreize reagieren – wie beispielsweise kostenlosen öffentlichen Verkehr für Ankunft und Abfahrt – und daher eher bereit sind, vom Auto auf den öffentlichen Verkehr umzusteigen. Daraus lässt sich ableiten, dass solche Personen empfindlicher auf die Reisezeitreduktion reagieren als Personen mit wenig Bezug zum öffentlichen Verkehr in ihrem Alltag.

## **7. Zusammenfassung**

Die zentrale Erkenntnis dieser Bachelorarbeit ist, dass der Bau des GBT einen positiven Effekt auf den Schienenverkehr hatte. Durch die Eröffnung des GBT entstandene Reisezeitverkürzung konnte das Angebot auf der Nord-Süd-Achse attraktiver gestaltet werden. Die Analyse zeigt, dass es nach der Eröffnung des GBT eine Verschiebung im Modalsplit zugunsten der Bahn im Gotthardkorridor gab, was sich in einem höheren Anteil der Bahn am Gesamtpersonenverkehr niederschlägt.

Dabei ist jedoch auch festzuhalten, dass die Eröffnung des GBT zu keiner substantziellen Reduktion des MIV führte. Dies weist darauf hin, dass neben der Reisezeitverkürzung auch andere Faktoren wie Komfort, Flexibilität und Gewohnheit die Verkehrsmittelwahl beeinflusst.

Die Methodik dieser Arbeit umfasste die Anwendung der Synthetic Control Method und der synthetischen Differenz-in-Differenzen-Methode, um kausale Zusammenhänge zwischen der Eröffnung des GBT und den Veränderungen im Verkehrsmuster zu isolieren. Diese Ansätze ermöglichten es, ein kontrafaktisches Szenario zu erstellen und die tatsächlichen Effekte des GBT auf den Verkehr zu schätzen, was die Robustheit der Ergebnisse unterstützt.

Die Limitationen der Arbeit, gerade die Auswahl der Vergleichseinheiten und die Verfügbarkeiten der Daten weisen auf die Notwendigkeit hin, zukünftige Studien mit einem breiteren Analysezeitraum und einer differenzierteren Analyse der Nutzergruppen durchzuführen.

Insgesamt liefert diese Arbeit Erkenntnisse für die Planung und Evaluierung zukünftiger Infrastrukturprojekte im Verkehrssektor und hebt die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsträgern hervor.

## Quellenverzeichnis

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. *Mobilität und Raum 2050: Sachplan Verkehr, Teil Programm.*

<https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/strategie-und-planung/konzepte-und-sachplaene/sachplaene-des-bundes/sachplan-verkehr-spv/sachplan-verkehr-spv--teil-programm.html>

Schweizerische Eidgenossenschaft. (2015). *Der Gotthard-Basistunnel – das Jahrhundertbauwerk.*

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/39641.pdf>

Bundesamt für Verkehr BAV. *Zukünftige Entwicklung der Bahninfrastruktur (ZEB).* BAV.

<https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/zeb.html>

Berset, A., Thurnherr, W. & Schweizerischen Bundesrates. (2018). *Botschaft zum Ausbausritt 2035 des strategischen Entwicklungsprogramms Eisenbahninfrastruktur vom 31. Oktober 2018.*

<https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/fabi-step/botschaft-as-2035.pdf.download.pdf/Botschaft%20AS%202035.pdf>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2021) *Langfristige klimastrategie 2050.*

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformation/en/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html>

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2021). *Monitoring.*

<https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/programme-und-projekte/raeumliche-auswirkungen-der-verkehrsinfrastrukturen/monitoring.html>

Givoni, M. & Dobruszkes, F. (2013). A Review of Ex-Post Evidence for Mode Substitution and Induced Demand Following the Introduction of High-Speed Rail. *Transport Reviews*, 33(6), 720–742.

<https://doi.org/10.1080/01441647.2013.853707>

Borsati, M., & Albalade, D. (2021). On the modal shift from motorway to high-speed rail: Evidence from Italy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 145–164. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.006>

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2016). *Verkehrsperspektiven 2040 - Synthesebericht.* <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/verkehr/verkehrsperspektiven-2040-synthesebericht.html>

Axhausen, K. W., König, A., Abay, G., Bates, J., & Bierlaire, M. (2001). *Swiss Metro: Modelling mode choice for long-distance travel*. *Journal of Transport Geography*, 9(2), 85–95. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00005-6)

Litman, T., © 2005-2024 & Victoria Transport Policy Institute. (2021). *Understanding Transport Demands and Elasticities*. <https://www.vtpi.org/elasticities.pdf>

Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.05.001>

Holmgren, J. (2007). Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(10), 1021–1035. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.003>

Goodwin, P., Dargay, J., & Hanly, M. (2004). Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. *Transport Reviews*, 24(3), 275–292. <https://doi.org/10.1080/0144164042000181725>

Bundesamt für Statistik (BFS) & Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2023). *Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021: Synthesetabellen*. Bundesamt für Statistik. <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/24267707>

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2024). *Definition touristische Verkehre (DtoV) (Schlussbericht)*. Bern: ARE. [https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/strategie-und-planung/freizeitmobilitaet.html#151\\_1471942858379\\_content\\_are\\_de\\_home\\_verkehr-und-infrastruktur\\_strategie-und-planung\\_strategie-freizeitverkehr-des-bundes\\_jcr\\_content\\_par\\_tabs](https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/strategie-und-planung/freizeitmobilitaet.html#151_1471942858379_content_are_de_home_verkehr-und-infrastruktur_strategie-und-planung_strategie-freizeitverkehr-des-bundes_jcr_content_par_tabs)

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. *Freizeitverkehr und touristischer Verkehr*. [https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/strategie-und-planung/freizeitmobilitaet.html#151\\_1471942858379\\_content\\_are\\_de\\_home\\_verkehr-und-infrastruktur\\_strategie-und-planung\\_strategie-freizeitverkehr-des-bundes\\_jcr\\_content\\_par\\_tabs](https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/strategie-und-planung/freizeitmobilitaet.html#151_1471942858379_content_are_de_home_verkehr-und-infrastruktur_strategie-und-planung_strategie-freizeitverkehr-des-bundes_jcr_content_par_tabs)

ArcGIS dashboards. Abgerufen am 21.01.2025. <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/1673b262537546098589ad3820e5ece2>

Medien | AlpTransit portal. Abgerufen am 11.12.2024. <https://www.alptransit-portal.ch/de/medien/file/2760/>

*Fahrplanarchiv* | *öv-info.ch*. Abgerufen am 27.01.2025. <https://www.oev-info.ch/de/fahrplan-aktuell/fahrplanarchiv>

Bundesamt für Verkehr. (2016). *Freie Fahrt durch den Gotthard-Basistunnel*.

<https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/publikationen/medienmitteilungen.msg-id-64811.html>

Bundesamt für Raumentwicklung. (2020). Monitoring Gotthard-Achse – Phase B: Verkehrliche und räumliche Auswirkungen der neuen Infrastruktur. <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/verkehr/mga-b.html>

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2022). *Monitoring Gotthard-Achse – Phase B. Verkehrliche und räumliche Auswirkungen der neuen Infrastruktur*. <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/verkehr/mga-b.html>

Ickert, L., Greinus, A. & INFRAS. (2019). Verkehrsentwicklung im alpenquerenden Güterverkehr infolge Fertigstellung der NEAT. In M. Wagner (Hrsg.), *Schlussbericht*. <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/it/dokumente/themen/verlagerung/schlussbericht-neat.pdf.download.pdf/Schlussbericht%20NEAT-Effekte%2013112019.pdf>

Bundesamt für Verkehr, Wagner, M., Dörnenburg, K., Haas, T., Lindenmann, M., Ickert, L., Bieler, C. & Kaufmann, S. (2020). Freight traffic by road and rail through the Swiss Alps 2019. In *Freight Traffic By Road And Rail Through The Swiss Alps 2019* [Report]. Federal Office of Transport. <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/verlagerung/aggv-haupterhebung-2019.pdf.download.pdf/Alpenquerender%20G%C3%BCterverkehr%202019.pdf>

Bundesamt für Strassen ASTRA. *Verkehrszähler*. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/nordostschweiz/abgeschlossene-projekte/verkehrsmanagement-der-infrastrukturfiliale-winterthur/projekt-im-ueberblick/verkehrszaehler.html>

Bundesamt für Strassen ASTRA. (o. D.). *Monats- und Jahresergebnisse*. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/automatische-strassenverkehrszaehlung/monats-jahresergebnisse.html>

Schweizerische Bundesbahn AG *Automatische Fahrgastzählung in Fernverkehrszügen* | SBB. Abgerufen am 10.01.2025

<https://company.sbb.ch/de/ueber-die-sbb/verantwortung/sicherheit/datenschutz/automatische-fahrgastzaehlung.html#:~:text=Bei%20der%20automatischen%20Fahrgastz%C3%A4hlung%20werden,optischen%20Sensoren%20in%20Betrieb%20genommen.>

Fredriksson, A. & De Oliveira, G. M. (2019). *Impact evaluation using Difference-in-Differences*. *RAUSP Management Journal*, 54(4), 519–532. <https://doi.org/10.1108/rausp-05-2019-0112>

Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2015). Comparative politics and the synthetic control method. *American Journal of Political Science*, 59(2), 495–510. <https://doi.org/10.1111/ajps.12116>

TMB-GEIE. (n.d.). *Verkehrsstatistiken*. Mont Blanc Tunnel. Abgerufen am 16.12.2024, <https://www.tunnelmb.net/de-DE/verkehrsstatistiken>

Sitaf S.p.A. (n.d.). Frejus Verkehrsdaten. Abgerufen am 16.12.2024, <https://www.sitaf.it/dati-di-traffico-t4/>

ASFINAG. (n.d.). *Verkehrszählung*. Abgerufen am 16.12.2024, <https://www.asfinag.at/verkehr-sicherheit/verkehrszaehlung/>

Blattler, K., H. Wallimann, " and W. von Arx (2024): "Free public transport to the destination: A causal analysis of tourists' travel mode choice," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 187, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104166>

Wallimann, H., von Arx, W., & Hesse, A. (2025). *The Effect of the Gotthard Base Tunnel on Road Traffic: A Synthetic Control Approach*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2505.21129>

## Anhang A

### Anhang A1: Tabelle Reisezeit

Tabelle 4: Reisezeit Zug und Auto

Abfahrts Ort <sup>2</sup>	Ankunfts Ort <sup>3</sup>	Fahrzeit Auto <sup>4</sup>	Fahrzeit Zug 2016 <sup>5</sup>			Fahrzeit Zug 2019 <sup>6</sup>			Unterschied Zug 2016   2019 <sup>7</sup>	Unterschied Zug 2016   2019 in %	Unterschied Auto   Zug
			Abfahrt	Ankunft	Dauer	Abfahrt	Ankunft	Dauer			
Bern	Bellinzona	02:50	11:00	14:25	03:25	09:00	11:57	02:57	00:28:00	14%	00:07
Luzern	Bellinzona	01:40	12:18	14:25	02:07	10:18	11:57	01:39	00:28:00	22%	-00:01
Basel	Bellinzona	02:50	11:04	14:25	03:21	09:04	11:57	02:53	00:28:00	14%	00:03
Zürich	Bellinzona	02:10	12:09	14:25	02:14	09:32	11:27	01:55	00:19:00	14%	-00:15
Bern	Lugano	03:10	11:00	14:50	03:50	09:00	12:26	03:26	00:24:00	10%	00:16
Luzern	Lugano	02:00	12:18	14:50	02:32	10:18	12:26	02:08	00:24:00	16%	00:08
Basel	Lugano	03:00	11:04	14:50	03:46	09:04	12:26	03:22	00:24:00	11%	00:12
Zürich	Lugano	02:30	12:09	14:50	02:39	09:32	11:56	02:24	00:15:00	9%	-00:06
Bern	Locarno	03:00	11:00	14:56	03:56	09:00	12:29	03:29	00:27:00	11%	00:29
Luzern	Locarno	01:50	12:18	14:56	02:38	10:18	12:29	02:11	00:27:00	17%	00:21
Basel	Locarno	03:00	11:04	14:56	03:52	09:04	12:29	03:25	00:27:00	12%	00:25
Zürich	Locarno	02:20	12:09	14:56	02:45	09:32	11:59	02:27	00:18:00	11%	00:07
Bern	Milano	03:50	10:04	15:35	05:31	11:00	15:50	04:50	00:41:00	12%	01:00
Luzern	Milano	02:40	11:40	15:35	03:55	12:18	15:50	03:32	00:23:00	10%	00:52
Basel	Milano	03:50	10:17	15:35	05:18	11:04	15:50	04:46	00:32:00	10%	00:56
Zürich	Milano	03:10	11:32	15:35	04:03	11:10	14:50	03:40	00:23:00	9%	00:30

<sup>2</sup> Beim Zug wurde immer der Hauptbahnhof gewählt, beim Auto der Angegebene Punkt von Google Maps

<sup>3</sup> Beim Zug wurde immer der Hauptbahnhof gewählt, beim Auto der Angegebene Punkt von Google Maps

<sup>4</sup> Kürzeste Angegebene Fahrzeit gemäss Google Maps, vom Montag, 08.April 2019, Abfahrt 11:00 Uhr,

<sup>5</sup> Gemäss Fahrplanfeld 600, [Fahrplanarchiv | öv-info.ch](http://fahrplanarchiv.öv-info.ch)

<sup>6</sup> Gemäss Fahrplanfeld 600, [Fahrplanarchiv | öv-info.ch](http://fahrplanarchiv.öv-info.ch)

<sup>7</sup> Der Unterschied kann sich je nach gewählter Verbindung ändern.

## Anhang A2: Herkunft Passagierzahlen GBT

Tabelle 5: Herkunft Passagiere GBT

Herkunft	Anteil	Personen
Kannibalisierung Bergstrecke	74.7%	8483
Verlagerung Strasse	2.7%	310
Induzierter Verkehr	22.6%	2565
Total GBT	100.0%	11358

## Anhang A3: Modalsplit

Tabelle 6: Modalsplit ohne GBT 2019 (Szenario)

Modalsplit ohne GBT 2019 (Szenario)		
Verkehrsmittel	Anteil	Personen
Auto	74.2%	26292
Bahn	25.8%	9133
Total:	100%	35425

Tabelle 7: Modalsplit mit GBT 2019 (Real)

Modalsplit mit GBT 2019 (Real)		
Verkehrsmittel	Anteil	Personen
Auto	74.2%	26292
Bahn	25.8%	9133
Total:	100%	35425

## Anhang B

### Anhang B1: Diff in Diff Analyse Passagiere Zug

#### Ausgabe:

```

=====
                                OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:                    Index    R-squared:                    0.879
Model:                            OLS      Adj. R-squared:                0.843
Method:                            Least Squares    F-statistic:                    24.22
Date:                            Sat, 10 May 2025    Prob (F-statistic):            6.65e-05
Time:                            18:15:18          Log-Likelihood:                -39.276
No. Observations:                  14          AIC:                            86.55
Df Residuals:                      10          BIC:                            89.11
Df Model:                            3
Covariance Type:                  nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	105.0000	2.367	44.362	0.000	99.726	110.274
treatment	-1.2500	3.347	-0.373	0.717	-8.708	6.208
post	6.6667	3.615	1.844	0.095	-1.389	14.722
did	21.2500	5.113	4.156	0.002	9.857	32.643

```

=====
Omnibus:                        0.490    Durbin-Watson:                2.179
Prob(Omnibus):                  0.783    Jarque-Bera (JB):             0.473
Skew:                            0.355    Prob(JB):                     0.790
Kurtosis:                       2.448    Cond. No.                     6.50
=====

```

Abbildung 14: Ergebniss diff in diff Analyse Passagiere Zug

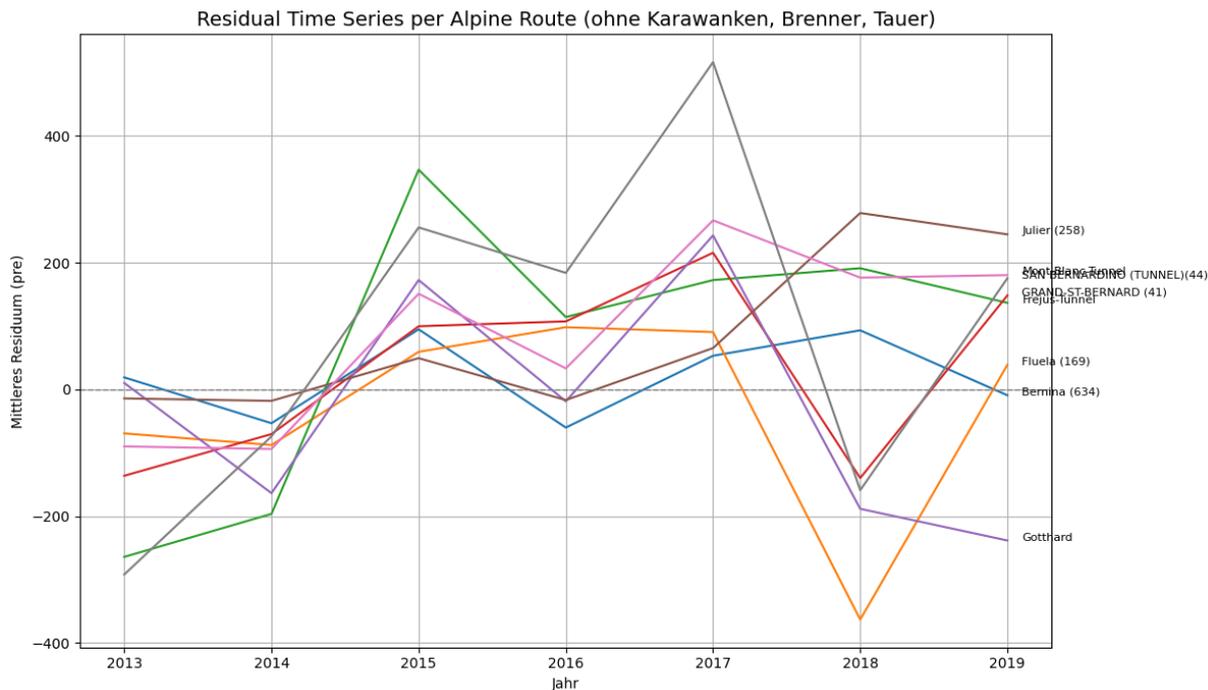


Abbildung 15: Residuen jährliche SCM

**Anhang B3: Berechnung jährliche SCM**  
**Jährliche SCM Variante 1:**

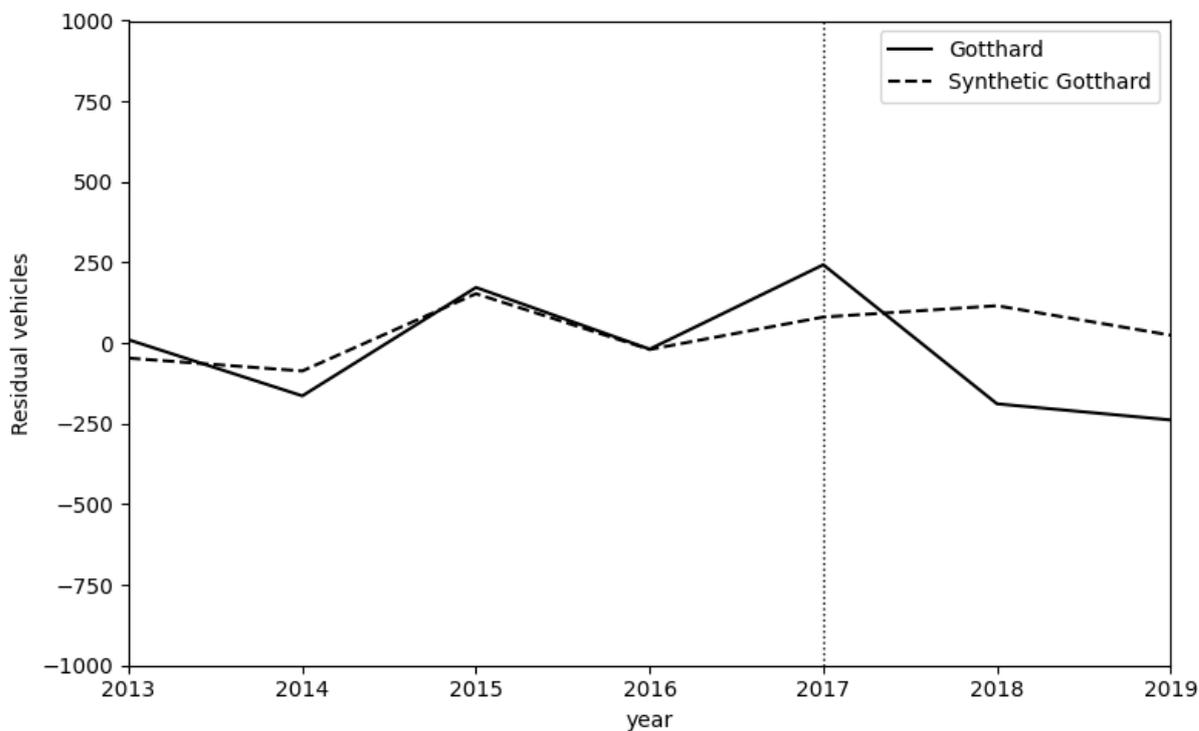


Abbildung 16: Ausgabe jährliche Variante 1

### Jährliche SCM Variante 2:

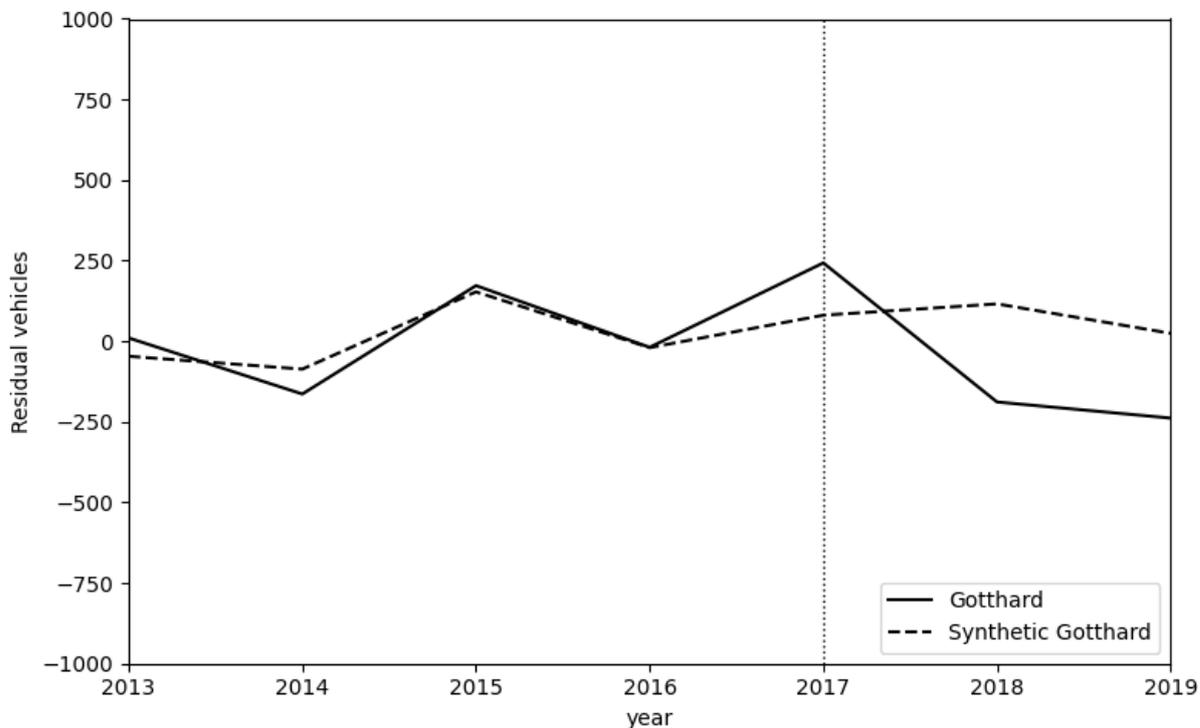


Abbildung 17: Ausgabe jährliche SCM Variante 2

### Jährliche SCM Variante 3 (gewählt):

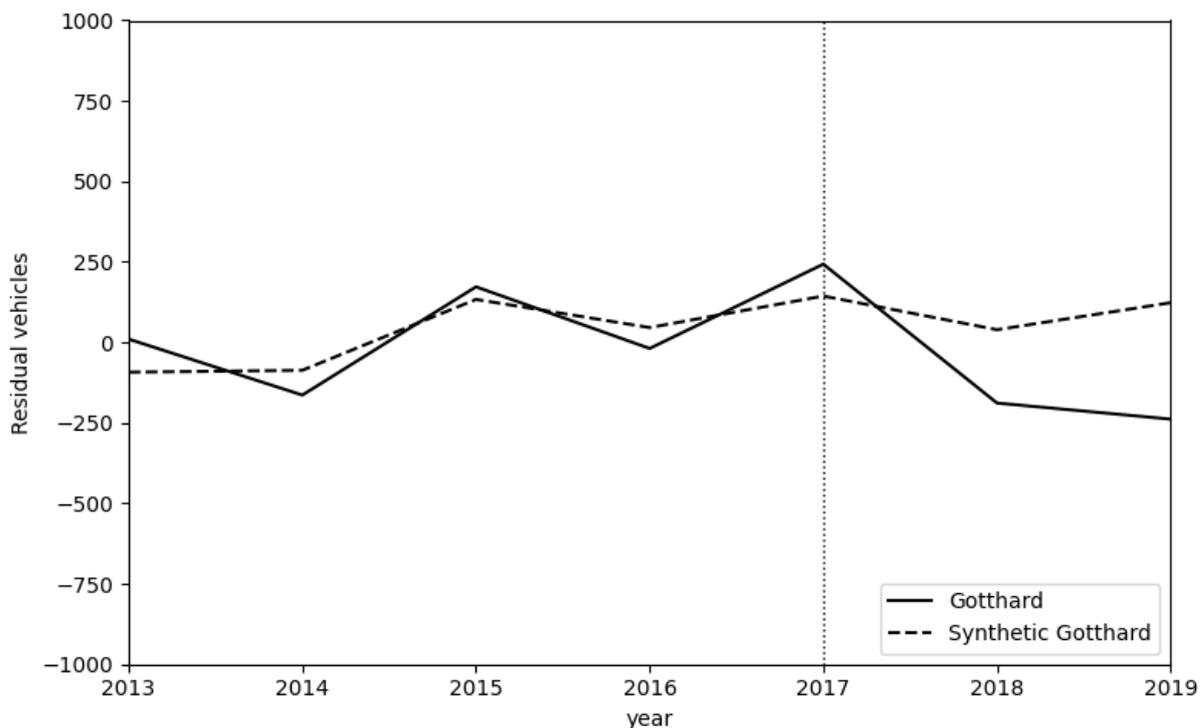


Abbildung 18: Ausgabe jährliche SCM Variante 3

**Jährliche SCM Variante 4:**

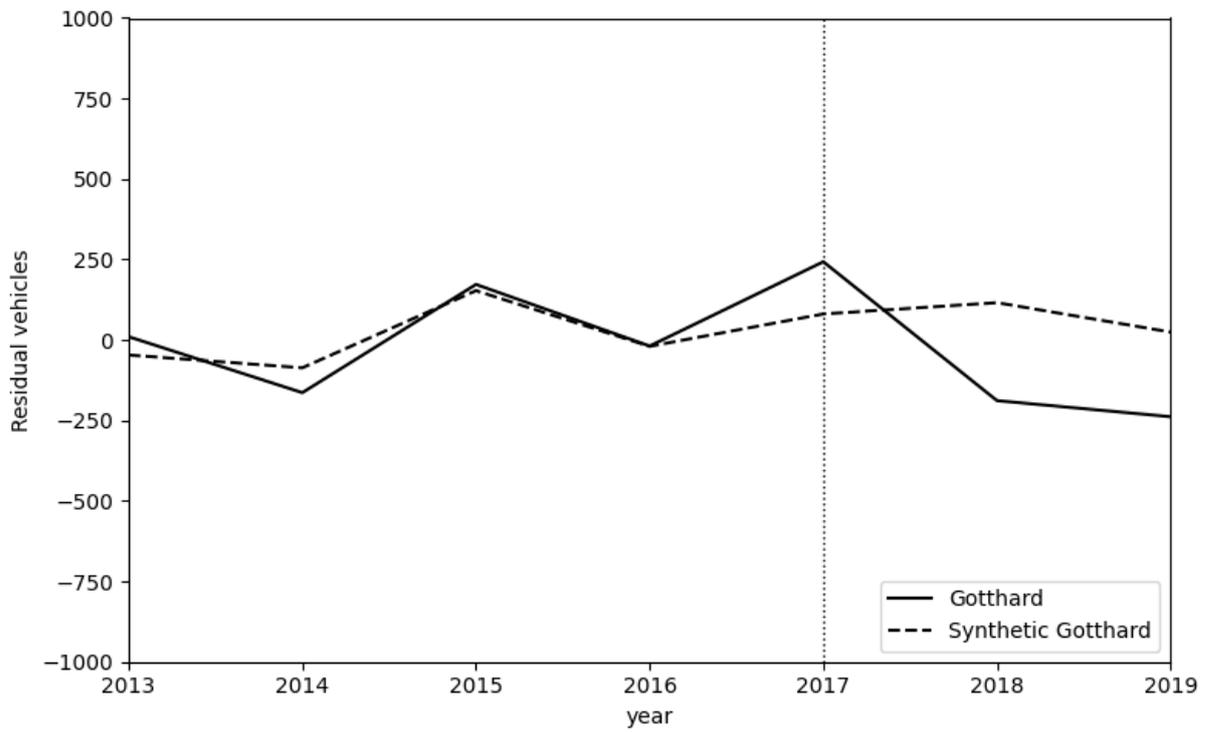


Abbildung 19:Ausgabe jährliche SCM Variante 4

## Anhang B4: Diff in Diff Auto Zug

### Ausgabe:

```

=====
                        OLS Regression Results
=====
Dep. Variable:          Value      R-squared:                0.922
Model:                  OLS        Adj. R-squared:           0.899
Method:                 Least Squares  F-statistic:              39.44
Date:                   Sun, 11 May 2025  Prob (F-statistic):       7.53e-06
Time:                   11:52:13     Log-Likelihood:           27.761
No. Observations:      14          AIC:                      -47.52
Df Residuals:          10          BIC:                      -44.97
Df Model:               3
Covariance Type:       nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	1.0303	0.020	52.280	0.000	0.986	1.074
Post	0.0161	0.030	0.535	0.605	-0.051	0.083
Treatment	0.0092	0.028	0.329	0.749	-0.053	0.071
Post_Treatment	0.2614	0.043	6.139	0.000	0.166	0.356

```

=====
Omnibus:                2.519   Durbin-Watson:           2.691
Prob(Omnibus):          0.284   Jarque-Bera (JB):        0.719
Skew:                   0.464   Prob(JB):                 0.698
Kurtosis:               3.608   Cond. No.                  6.50
=====

```

Abbildung 20: Diff in Diff Auto Zug

## **Anhang C**

### **Anhang C1 ChatGPT-4**

- Der Code zur Berechnung wurde teilweise mit ChatGPT gemacht
- Umformulierungen sowie Rechtschreibung wurde mit ChatGPT gemacht

### **Anhang C2 Duden.ch**

- Grammatik und Rechtschreibung mit duden.ch

### **Anhang C3 Paper: The Effect of the Gotthard Base Tunnel on Road Traffic: A Synthetic Control Approach**

- Textabschnitte aus dem Paper umgeschrieben
- Berechnungen aus dem Paper von Hannes Wallimann zur Interpretation verwendet.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Mithilfe Dritter verfasst habe, dass ich ausschliesslich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe, dass ich alle wörtlich oder sinngemäss aus Quellen übernommenen Gedanken gekennzeichnet und mit den nötigen Quellenangaben versehen habe (dies gilt auch für Abbildungen und Tabellen), dass ich das Vertraulichkeitsinteresse der Auftraggebenden wahren und die Urheberrechtsbestimmungen der Hochschule Luzern respektieren werde.

Fraubrunnen, 31.05.2025

Ort, Datum



Unterschrift