Autotunnel: Selbstfahren oder rollende Strasse?: Einführungsvorlesung

Autor(en): **Grob, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **85 (1967)**

Heft 17

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-69437

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Autotunnel: Selbstfahren oder rollende Strasse?

DK 625.712.35

Einführungsvorlesung von Prof. **Hans Grob**, gehalten an der ETH, Zürich, am 18. Februar 1967

Aufgabenstellung

Alle Strassenbenützer kennen die Probleme, auf welche der Strassenverkehr stösst, wenn sich die Fahrzeuge mit eigener Kraft durch Tunnel bewegen sollen. Es handelt sich immer um Luft und Licht, denn die Fahrsicherheit wird entscheidend beeinträchtigt durch giftige Abgase der Benzinmotoren, Rauchentwicklung und unangenehme Reizstoffe der Dieselmotoren sowie ganz allgemein durch die Dunkelheit im Berginnern. Sobald wir also unter Tag selbst fahren, benötigen wir eine Ventilation und eine Beleuchtung, deren Baukosten zusammen 30 bis 40% der Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes ausmachen können.

Das Selbstfahren ist ein Ausdruck aus der Binnenschiffahrt, wo man die Kähne mit eigenem Motor, die sog. Selbstfahrer, von den Schleppkähnen unterscheidet, welche von einem Schlepper gezogen werden müssen. Die rollende Strasse würde also dem Schleppen entsprechen, nur sollte dieses Schleppen nicht bloss ein sporadisches Aufladen bedeuten im Sinne eines Notbehelfes, wie das bisher den Automobilisten da oder dort vorgekommen ist, etwa beim Bahnverlad unter einem geschlossenen Pass oder einer Fähre in Holland. Die rollende Strasse sollte einen möglichst kontinuierlichen Transport bieten, allerdings mit abgestelltem Motor, um die erwähnten Schwierigkeiten zu vermeiden.

In dieser Hinsicht sind schon allerlei Vorschläge gemacht worden, etwa in der Form eines Transportbandes oder Rollteppiches oder einer Transportkette. Beim ersten Vorschlag hätten die Fahrzeuge aufzufahren, so dass ihre Räder während dem Transport still stehen würden. Im Falle der Kette müssten die Fahrzeuge angehängt werden und würden dann auf eignen Rädern rollen. Sicher wären zur Verwirklichung solcher Vorschläge mancherlei technische und finanzielle Probleme zu lösen. Abgesehen davon kann man sich leicht ausrechnen, dass die Leistungsfähigkeit einer solchen Transportvorrichtung ganz bedeutend sein würde. Der Hauptnachteil scheint mir in der relativ geringen Geschwindigkeit zu liegen. Wenn sich ein solches Transportband mit 30 km/h, d.h. etwa 8 m/s bewegt, was für heutige Bänder schon eine ganz erhebliche Geschwindigkeit bedeutet, so beträgt die Fahrzeit durch einen 15 km langen Tunnel etwa ½ Stunde. Und das ist offenbar für eilige Automobilisten zu viel. Ich kehre daher zum altbewährten Bahntransport zurück und versuche, ihn den Bedürfnissen des Strassenverkehrs möglichst anzupassen.

Bisher sind Strassentunnel immer als Selbstfahrtunnel gebaut worden. Es sind schon eine ganze Anzahl davon in Betrieb mit Längen bis zu 2 und 3 km, teils mit, teils ohne Lüftung. Bereits gibt es auch längere Alpendurchstiche, zunächst den Tunnel am Grossen St. Bernhard mit 5,8 km Länge. Er hat kürzlich sein millionstes Fahrzeug erlebt, d.h. er wird jährlich von etwa 350000 Autos benützt. Als Vergleich sei erwähnt, dass die Bundesbahnen letztes Jahr 576000 Fahrzeuge durch den Gotthard transportiert haben. Mit 6,6 km Länge ist der gegenwärtig im Bau befindliche Tunnel San Bernardino der zweitgrösste und endlich der Mont-Blanc-Tunnel mit 11,5 km Länge der bisher weitaus längste Strassentunnel.

Geplant sind natürlich noch weit mehr lange Tunnel, und zwar nicht nur Alpendurchstiche, sondern auch solche, welche breite Wasserläufe und Meeresarme unterfahren sollen. Ein Beispiel davon ist der Öresund, wo ein Tunnelprojekt von 6 bis 8 km Länge in Konkurrenz mit einer Brücke steht. Es scheint, dass im Tunnel eher eine rollende Strasse in Frage kommt, obschon damit eine Fahrzeitverlängerung von etwa 10 Minuten in Kauf genommen werden müsste. Die Einsparungen scheinen zu überwiegen. Am Gotthard ist zwischen Göschenen und Airolo ein belüfteter Strassentunnel von 16 km in Projektierung begriffen. Als Verbindung zwischen dem Berner Oberland und dem Wallis ist u.a. ein Tunnel von 26 km Länge geplant (Breithorn) und zwar mit einer isolierten Tunnelbahn, also einer rollenden Strasse. Im Projekt für einen Gotthard-Basistunnel von 45 km Länge war neben einer Bahnlinie auch eine Strasse enthalten. Dagegen hat es sich bei der Projektierung des Tunnels unter dem Ärmelkanal eindeutig erwiesen, dass eine rollende Strasse günstiger ist.

Generell lässt sich offenbar leicht erkennen, dass der Bahntransport sich eher für lange Tunnel eignet, während bei kurzen bis mittleren Tunnellängen eher ein Selbstfahren in Frage kommt. Wie die Aufzählung aber zeigt, sind die Meinungen offenbar nicht einheitlich, vielleicht auch deshalb, weil nicht nur Fachleute bei den Diskussionen mitwirken.

Da mich das Problem schon seit langem beschäftigt hat und weil auch der Gotthard-Tunnel sich gerade in einem aktuellen Stadium der Projektierung befindet, habe ich mir zur Aufgabe gestellt, eine Grenze zwischen den Anwendungsbereichen der beiden Systeme zu suchen. Das Problem wurde vor etwa 10 Jahren, als das Nationalstrassennetz geplant wurde, schon einmal behandelt, jedoch mit kleinerem Verkehr und eher kleineren Tunnellängen.

Auf der Suche nach der Tunnelgrenzlänge betrachte ich die folgenden Kriterien: *Zeit, Kosten und Sicherheit*. Ich habe mir ferner überlegt, ob auch die Gebührenfrage ein Kriterium abgibt. Das scheint nicht der Fall zu sein, denn das Problem ist in beiden Fällen das selbe. Einfachheitshalber habe ich in meinen folgenden Untersuchungen die Erhebung eines Tunnelzolles weggelassen und zwar auch deshalb, weil ich der Meinung bin, dass ein so grosses System wie das Nationalstrassennetz sich nicht durch Gebührenerhebung an einzelnen Stellen finanzieren lässt und dadurch die direkt angrenzenden Landesteile benachteiligt würden.

Kriterium Zeit

Beim *Selbstfahren* rechne ich auf offener Autobahn mit einer mittleren Geschwindigkeit von 90 km/h. Im Tunnel ist normalerweise die Geschwindigkeit beschränkt, beispielsweise im Mont-Blanc-Tunnel auf 70 km/h, was mir für längere Tunnel bei mässiger Verkehrsbelastung durchaus angemessen erscheint. Steigt die Verkehrsmenge über die zulässige Belastung von 1200 Fz/h, so sinkt die Geschwindigkeit infolge gegenseitiger Behinderung, so dass ich ab etwa 1500 Fz/h mit 50 km/h rechne. Die Durchfahrtszeit durch den Tunnel lässt sich durch zwei Geraden als Funktion der Tunnellänge darstellen (siehe Bild 11).

Auf der *rollenden Strasse* entsteht an den Tunnelenden unabhängig von der Tunnellänge ein Zeitverlust, welcher durch folgende Vorgänge bedingt ist:

- Auf- und Ablad der Fahrzeuge je nach Verladeanlage
- Bremsen und Anfahren der Autos
- Anfahren und Bremsen des Bahnzuges.

Für die letzteren beiden Verluste setze ich generell 2 Minuten ein. Die Geschwindigkeit der Tunnelfahrt ist mit 125 km/h angesetzt. Die Gesamtdurchfahrtszeit der rollenden Strasse stellt also eine flachere Gerade dar, die aber nicht durch den Nullpunkt verläuft, sondern um die Summe der Verlustzeiten höher liegt.

Die Schnittpunkte der verschiedenen Zeitgeraden ergibt uns die Tunnelgrenzlänge mit gleicher Fahrzeit beider Systeme. Unter

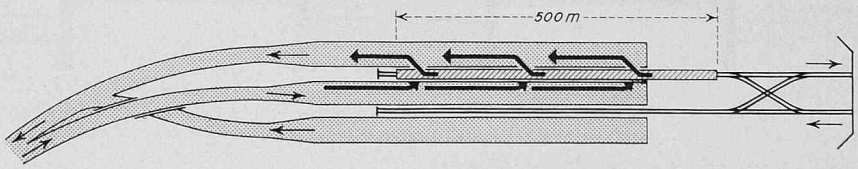


Bild 1. Stationsschema 1. Einfache Anlage mit zwei Ladegleisen. Während die vom Zug herantransportierten Fahrzeuge nach aussen wegfahren, stellen sich diejenigen der andern Richtung auf der mittleren Rampe zum Aufladen bereit

dieser Grenzlänge ist das Selbstfahren, darüber die rollende Strasse rascher. Für den Zeitvergleich sind also besonders die Auf- und Abladezeiten beim Bahnverlad wesentlich, d.h. wir müssen uns eine Vorstellung von den Verladeanlagen machen.

Die einfachste Lösung dieser Aufgabe ist die in Bild 1 dargestellte doppelspurige Pendelbahn. Die Station umfasst zwei Ladegleise mit dazwischenliegender Laderampe und zwei aussenliegenden Ausfahrrampen. Es sind einstöckige Bahnwagen vorgesehen, wie sie heute vielerorts im Einsatz stehen. Die Zugsfolge ist einerseits beschränkt durch die vom Ladevorgang beanspruchte Zeit, d.h. durch den Umstand, dass Laden und Entladen zeitlich gestaffelt am gleichen Ort abgewickelt werden. Ferner liegt vor dem Tunnel eine Kreuzungsweiche, die auch bei Vermehrung der Ladegleise die Zugsfolge beschränken würde. Immerhin ist es ohne weiteres möglich, die Züge mit 5 Minuten Abstand aufeinander folgen zu lassen. Eine Zugslänge von 500 m entspricht einer Tragfähigkeit von 100 Personenwagen, so dass die 12 Züge pro Stunde 1200 Fahrzeuge in jeder Richtung transportieren können.

In Wirklichkeit sind die Verkehrsrichtungen meist ungleich belastet. Unter der Annahme, dass in der Gegenrichtung nur 400 Fahrzeuge ankommen, würde die stündliche Leistung 1200 + 400 = 1600 PWE/h betragen. Das entspricht bereits dem Planungsziel des Gotthard-Tunnels, das etwa 1980 erreicht sein dürfte. Die Zahl nähert sich bereits auch der Leistungsfähigkeit einer Zweispur-Strasse mit Gegenverkehr (Schluckfähigkeit bei Bildung von Kolonnen). Die Leistungsfähigkeit der einfachen Anlage ist also schon ganz erheblich, jedoch erweist sich der Transportvorgang als etwas langsam, wenn man die Verlustzeiten zusammenzählt. Der Zeitbedarf für das Aufstellen der Fahrzeuge auf der Laderampe, für das Laden und das Entladen beträgt im Mittel 8 min, so dass zusammen mit den erwähnten 2 min für Beschleunigung und Verzögerung eine Verlustzeit von 10 min entsteht.

Dieser Zeitverlust lässt sich verkürzen durch eine räumliche Trennung von Aus- und Einlad, die dann gleichzeitig ablaufen können. Ferner soll ohne Aufstellen von Kolonnen auf der Laderampe direkt von der Strasse weg auf den Zug gefahren werden können. Im Schema Bild 2 ist daher eine Aus- und Einladehälfte des Bahnhofes festzustellen und zwar je eine Laderampe mit zwei zugehörigen Gleisen. Zwischen Tunnel und Station ist keine Kreuzungsweiche mehr vorhanden,

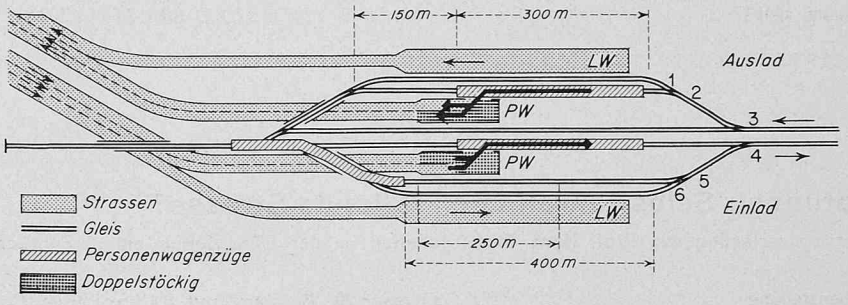


Bild 2. Stationsschema 2. Anlage getrennt in Ablad- und Einladseite mit zwischenliegendem Ausziehgleis. Auf jeder Seite ein Ladegleis mit Rampe für Lastwagen und zwei Ladegleise mit doppelstöckiger Rampe für Personenwagen. Sortierung des Verkehrs nach Fahrzeughöhe auf der ankommenden Strasse

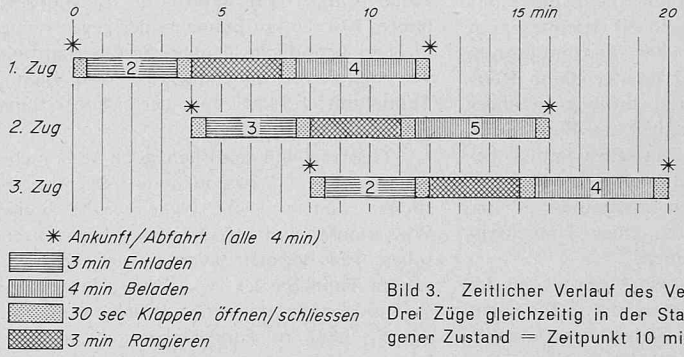


Bild 3. Zeitlicher Verlauf des Verladens nach Schema 2. Drei Züge gleichzeitig in der Station. In Bild 2 eingetragener Zustand = Zeitpunkt 10 min

sondern an ihrer Stelle ein Ausziehgleis am andern Ende der Station, das für die Verschiebung der Züge von der Auslade- zur Einladeseite dient. Sobald also ein Zug seine Fahrzeuge auf die Ausladerampe entlassen hat, wechselt er via Ausziehgleis auf die Einladeseite hinüber und übernimmt dort seine neue Ladung.

Wieder ist ein Zug für den Transport von 100 Autos eingerichtet. Um den Lade- und Entladevorgang etwas zu beschleunigen und auch um die Züge kürzer zu halten, sind die 100 Wagen in zwei Gruppen aufgeteilt, die sich auf zwei Stockwerke der Transportwagen verteilen. Die Ladezeit für eine Gruppe von 50 Wagen beträgt etwa 4 min, die Entladezeit etwas weniger. Im einfachsten Fall beträgt auch die Zugsfolge 4 min, so dass die 15 Züge pro Stunde in jeder Richtung 1500 Wagen transportieren können. Das übersteigt die Kapazität einer Zweispur-Strasse. Auf dem Schema ist daher eine Autobahnzufahrt eingetragen (im Vergleichs-Fall eines belüfteten Strassentunnels müsste eine zweite Röhre vorhanden sein).

Der zeitliche Ablauf des Aus- und Einlades ist in Bild 3 dargestellt. Charakteristisch ist, dass das Einladen von der gleichen Rampe aus in ununterbrochener Aufeinanderfolge auf die jeweils bereitstehenden Züge erfolgt und nur von einem Verkehrszeichen nach rechts oder links gesteuert zu werden braucht. Die Verlustzeiten in den Stationen ergeben die folgenden Werte in Minuten:

	1. Fz	100. Fz	Mittel
Auflad	4	—	
Zugs-Abfahrt	0,5	0,5	
Zugs-Ankunft	0,5	0,5	
Auslad	—	3,0	
Summe	5,0	4,0	4,5
Bremsen, Anfahren			2,0
		Total	6,5 min

Bild 4 zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Bahnstation samt einem zweistöckigen Transportwagen. Die Rampe ist ebenfalls doppelstöckig vorgesehen. Von den heranfahrenden Autos wird beispielsweise die innere Fahrspur der Autobahn auf das obere und die äussere auf das untere Stockwerk geleitet. Wie aus dem Tunnelprofil Bild 5 ersichtlich ist, übersteigen die Trans-

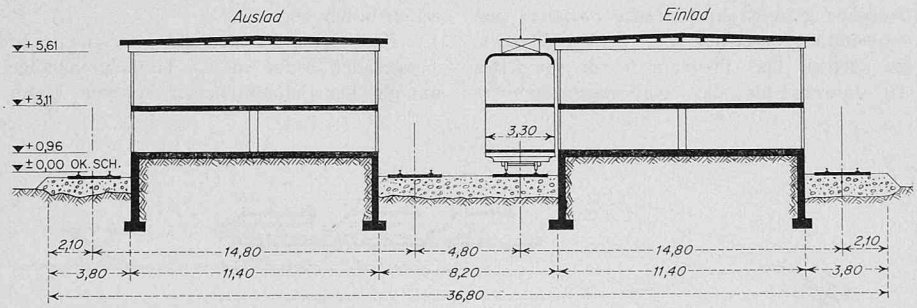


Bild 4. Querschnitt durch die Station, Massstab 1:350

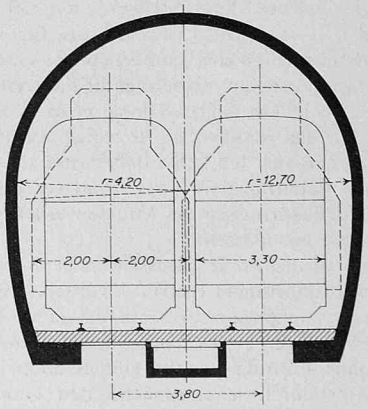


Bild 5 (rechts). Tunnelquerschnitt, Massstab 1:175. Voller Strich = Profil der doppelstöckigen Transportwagen; gestrichelt = normales Lichtraumprofil der SBB

portwagen allerdings das Lichtraumprofil der Schweiz. Bundesbahnen, so dass der Tunnel etwas erhöht werden muss, und die lichte Querschnittsfläche annähernd diejenige eines Strassentunnels erreicht, d.h. etwa 8 m² mehr beträgt als bei einem normalen Bahntunnel.

Wie die doppelstöckigen Transportwagen etwa aussehen werden, ist auf Bild 6 gezeigt, das aus dem Prospekt für den Ärmelkanal-Tunnel stammt. Die Wagen scheinen verglast zu sein. Es würde vielleicht eine Blechverschalung genügen, wenn das Wageninnere beleuchtet ist. Die Verschalung ist übrigens ein wesentlicher Faktor zur Reduktion des Luftwiderstandes und damit der Traktionsenergie bei der Fahrt durch den Tunnel. Die doppelstöckigen Züge werden im Bild von zwei Seiten her beladen und entladen und zwar von einstöckigen Rampen aus, die in der Höhe gestaffelt sind. Dies bringt gegenüber Bild 4 eine Vereinfachung der Rampen-Konstruktion, braucht aber erheblich mehr Platz, was in unseren engen Alpentälern zu Schwierigkeiten führen könnte.

Eine Komplikation bedeutet es ferner, dass die doppelstöckigen Wagen natürlich nur Personenautos aufnehmen können, welche weniger als 2 m hoch sind. Lastwagen und beispielsweise Wohnwagenanhänger müssen separate Züge mit einstöckigen Wagen benützen, für welche zu beiden Seiten besondere Laderampen vorgesehen sind. Der heranrollende Verkehr ist daher aufzuteilen, was mit einer wiederholten Signalisation ohne grössere Schwierigkeiten möglich sein sollte. Die hohen und langsamen Fahrzeuge werden vielerorts sowieso eine Kriechspur benützen. Von der oben berechneten Transportkapazität in PWE werden also laufend einzelne Fahrzeuge abgespalten und auf die einstöckigen Züge verladen, die dann vielleicht etwa alle halben Stunden in den Fahrplan eingeschaltet werden müssten.

Durch eine einfache Erweiterung der Station, nämlich durch Anfügen eines zweiten Rangiergleises, lässt sich die Zahl der im Bahnhof sich aufhaltenden Züge auf 4 vermehren. Damit lässt sich die Zugsfolge auf 3 min drücken, so dass die Transportkapazität auf 2000 Fz/h und Richtung steigt. Das entspricht der sogenannten zulässigen Belastung einer Autobahn, d.h. dem Verkehr, der sich ohne wesentliche Kolonnenbildung abspielen kann. Die volle Leistungsfähigkeit der Autobahn bei mehr oder weniger lückenloser Kolonnenbildung beträgt aber etwa 3600 Fz/h in jeder Richtung. Wenn man sich fragt, ob die beiden Tunnelgleise auch diese Belastung noch bewältigen können, so lautet die Antwort ja, unter der Voraussetzung, dass die Ladeanlagen entsprechend bemessen werden.

Bild 7 zeigt ein Bahnhof-Schema, das eine derartige Verkehrsmenge zu bewältigen vermag. Neu ist hier eine Wendeschleife, so dass weder Kreuzungen noch Hin- und Herrangieren nötig ist. Rampengleise können in beliebiger Anzahl eingeschalten werden (hier deren je 3 für PW und eines für LW). Weil auf dem Schema einfacher zu zeichnen, sind Rampen dargestellt gemäss dem Projekt für den Tunnel unter dem Ärmel-Kanal. In der gleichen Zeit laden je zwei Züge aus, zwei wenden und zwei laden ein, d.h. es halten sich sechs Züge im Bahnhof auf (siehe auch Bild 8). Die Züge fassen 150 Fahrzeuge, d.h. 75 in jedem Stockwerk. Für Aus- und Einlad einer solchen Gruppe sind je 5 min vorgesehen. Die beiden Vorgänge überlappen sich für zwei Züge jeweils um die Hälfte, womit wir eine Zugsfolge von 2,5 min erhalten. Die Transportleistung beträgt daher 24 × 150 = 3600 Fz/h in jeder Richtung.

Wichtig ist es, dass die Autos, welche von der Strasse heranrollen, auf möglichst einfachem Wege zum Zug gelangen, damit Stockungen vermieden werden können. Es geht in unserem Fall darum, die anrollende Doppelkolonne in Gruppen von 2 × 75 Wagen (2,5 min) zu unterteilen. Dies geschieht an einem Platz mit drei Ausgängen, von denen jeweils zwei durch rote Lichter gesperrt sind. Der dritte führt zum nächsten bereitstehenden Zug. Das Ausladen ist einfacher, doch wird

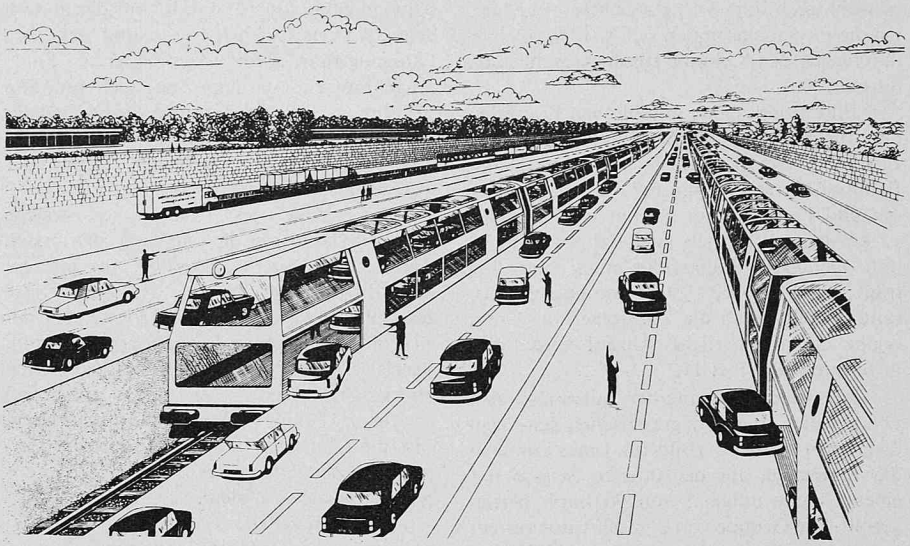


Bild 6. Verladebahnhof zum projektierten Tunnel unter dem Aermelkanal: links hinten einstöckiger Lastwagenzug, vorne doppelstöckige Personenwagenzüge; links Einlad, rechts Auslad von verschieden hohen Rampen aus

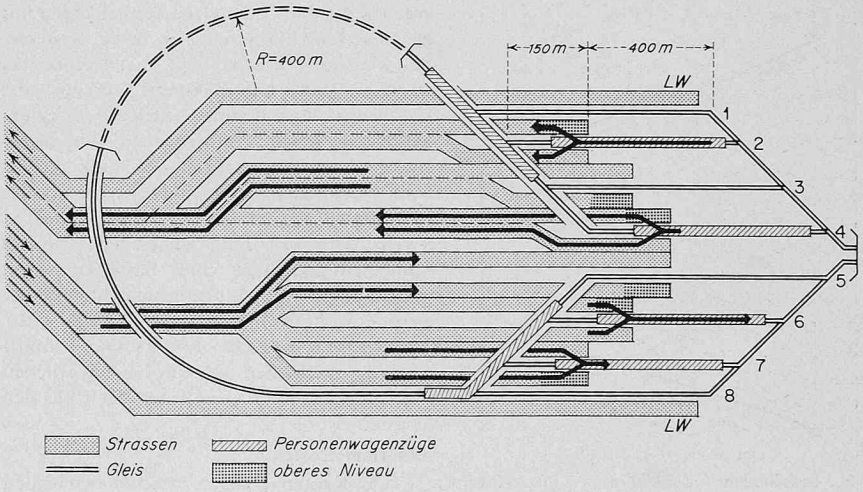


Bild 7. Stationsschema 4 mit Wendeschleife. Je ein Ladegleis für Lastwagen, drei Gleise für Personenwagen; einstöckige, in der Höhe versetzte Rampen. Gesamtbreite der Station rund 90 m

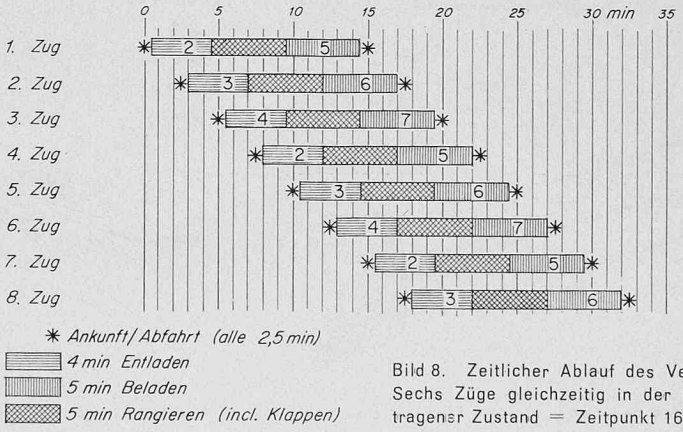


Bild 8. Zeitlicher Ablauf des Verladens nach Schema 4. Sechs Züge gleichzeitig in der Station. In Bild 7 eingetragener Zustand = Zeitpunkt 16½ min

es wohl auch dort Verkehrslichter brauchen, wo die Fahrzeuggruppen sich wieder zu einer durchgehenden Kolonne zusammenschliessen müssen.

Bild 9 zeigt einen graphischen Zugsfahrplan für das Bahnhofschema Bild 2 mit einer Zugsfolge von 4 min. Der Aufenthalt im Bahnhof beträgt 12 min für Auslad, Rangieren und Laden. Dazu kommt im Fall eines 15 km langen Tunnels eine Fahrzeit von 10 min. Der ganze Fahrzyklus eines Zuges beträgt daher $2 \times 22 = 44$ min. Dieser Zeitraum geteilt durch die Zugsfolge von 4 min ergibt die erforderliche Anzahl Züge, d.h. in unserem Beispiel 11.

Auch die Bewegung der Autos lässt sich übersichtlich auf einem graphischen Zeit-Wegdiagramm darstellen (Bild 10). Links kommen die Fahrzeuge auf der offenen Strasse mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h herangerollt. Die Gruppe von 2×50 Autos verteilt sich dabei auf 6 km Länge (M = 1500 Fz/h). Die Spitze einer solchen Gruppe hat vor der Einfahrt auf den Zug zu bremsen und anschliessend eine Weile zu warten, bis das letzte Fahrzeug aufgeschlossen hat. Die Gruppe fährt dann auf 250 m Länge zusammengedrängt durch den Tunnel mit der Geschwindigkeit von 125 km/h. Auf der andern Seite hält der Zug wieder an und das erste Fahrzeug fährt sofort weg; die letzten Fahrzeuge müssen auf dem Zug noch auf ihre Abfahrt warten. Die Gruppe wird so wieder auseinander gezogen und fährt auf der Strasse wieder in der ursprünglichen, mehr oder weniger gleichmässigen Kolonne.

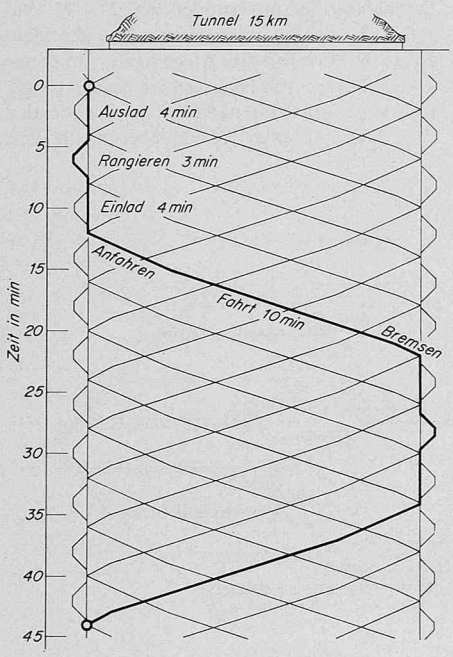


Bild 9. Graphischer Zugsfahrplan für einen 15 km langen Tunnel mit Stationen nach Schema 2

Jede Linie des Diagrammes, welche steiler verläuft als die Neigung der ersten Geraden, bedeutet Zeitverlust. In unserem Falle beträgt die Summe der Zeitverluste gegenüber einer ununterbrochenen Fahrt mit 90 km/h, d.h. ohne Tunnel, gegen 4 min. Vergleichen wir jedoch mit der reduzierten Fahrgeschwindigkeit der Autos in einem belüfteten Tunnel (70 km/h), so zeigt sich, dass die schnellere Fahrweise des Transportzuges die Zeitverluste des Ein- und Ausladens beinahe wieder aufwiegt.

Die Fahrzeiten der beiden Fahrweisen sind am besten auf dem Diagramm Bild 11 zu vergleichen. Für das Selbstfahren sind die beiden Linien für unbehinderte (70 km/h) und behinderte Fahrt (50 km/h) eingetragen. Für die rollende Strasse bleibt die Durchfahrtsgeschwindigkeit immer die selbe (125 km/h), hingegen sind die von der Tunnellänge unabhängigen Verlustzeiten je nach Dichte des Fahrplanes einzutragen. Im Gegensatz zur Strasse ergibt dort eine grosse Verkehrsmenge einen dichten Fahrplan und damit eine raschere Bedienung, während bei kleinerem Verkehr aus wirtschaftlichen Gründen der Fahrplan aufgelockert werden muss, so dass dann längere Wartezeiten entstehen. Die Schnittpunkte der entsprechenden Linien ergeben die gesuchten Grenztunnellängen mit gleicher Durchfahrtzeit für beide Systeme. Bei kleinem Verkehr liegt die Grenze bei $20 \div 25$ km, bei dichtem Verkehr bei $8 \div 9$ km. Man könnte vielleicht mit einem Mittel von etwa 15 km rechnen. Die gestrichelten Linien bezeichnen den Fall, da der belüftete Strassentunnel länger wird als der Bahntunnel an der gleichen Stelle. Dies ist jeweils dann der Fall, wenn der Strassentunnel einigermassen einer Passenke folgen muss, damit die Lüftungsschächte kürzer werden, wobei man dann eine Mehrlänge der Tunnelröhre in Kauf nimmt. Die Schnittpunkte verschieben sich in einem solchen Fall nach links, d.h. zugunsten der rollenden Strasse.

Kriterium Kosten

Der Kostenvergleich zwischen den beiden Systemen erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie der Zeitvergleich, und zwar werden in Bild 12 die Kosten über der Tunnellänge aufgetragen.

Als Kosten gilt die Summe der Anlagekosten und der kapitalisierten Jahreskosten für Betrieb, Unterhalt und Erneuerung. Wieder beginnt die Linie des Selbstfahrtunnels fast im Nullpunkt und ist etwas steiler als diejenige der rollenden Strasse, deren Tunnelröhre eben billiger ist. Dafür beginnt jene Linie bei einer erheblichen Anfangs-Investition (Stationen), welche unabhängig von der Tunnellänge ist. Es muss wieder ein Schnittpunkt entstehen, der die Grenzlänge der Kostengleichheit angibt.

Natürlich muss die Kostenrechnung abstrahieren von örtlichen Besonderheiten. Ich habe z.B. einen parabelförmigen «Normal-Berg» untersucht mit Tunnellängen von 10, 15 und 20 km und einer Überlagerung, die etwa den Längen der Lüftungsschächte entspricht, wie sie bei unseren Alpendurchstichen entstehen.

Bezüglich Verkehrsmenge wurden drei Zustände untersucht, und zwar

800 PWE/h heutiger Verkehr am Gotthard
1600 PWE/h Planungsziel 1980 am Gotthard
2×3600 PWE/h Leistungsfähigkeit der vierspurigen Autobahn

Die genannten Zahlen entsprechen der Verkehrsmenge etwa der 30 höchstbelasteten Stunden im Jahr, dann aber geht der Verkehr zurück, was in der sogenannten Dauerkurve des Verkehrs berücksichtigt wird, bei welcher die Stunden eines ganzen Jahres in der Reihenfolge ihrer Verkehrsmenge aneinandergereiht werden (gestrichelte Kurve in Bild 13). Diese Kurve wurde vom Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau für das Planungsziel 1980 sorgfältig bestimmt und ergibt dann ein jährliches Verkehrsvolumen von 2,2 Millionen Fahrzeugen. Für die andern beiden der genannten Verkehrsfälle wurde die gleiche Kurve benützt, d.h. proportional verkleinert oder vergrössert.

Die Kosten für den *belüfteten Strassentunnel* setzen sich wie folgt zusammen:

Anlage: – Tunnelröhre, Luftschächte, Ventilationszentralen
– Elektromechanische Installationen für Luft, Licht, Signalisation
– Dienstgebäude, Dienstfahrzeuge

Betrieb: – Personal
– Energie und Unterhalt der Ventilation und Beleuchtung

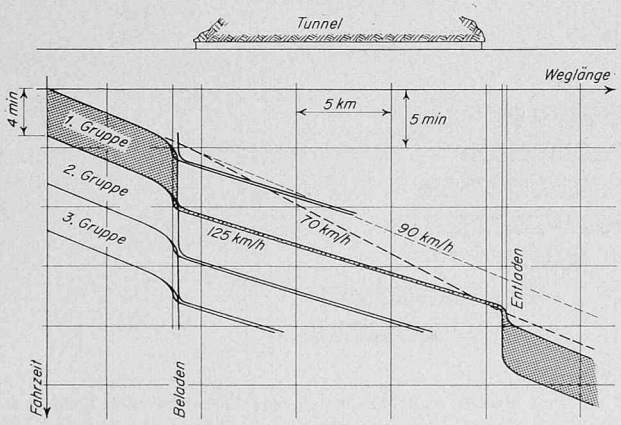


Bild 10. Zeit-Weg-Diagramm der Autos für den Fall wie Bild 9

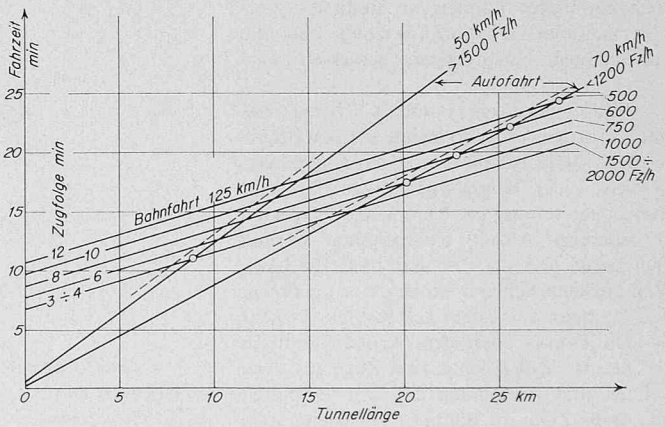


Bild 11. Vergleich der Tunnelfahrzeiten beider Fahrweisen

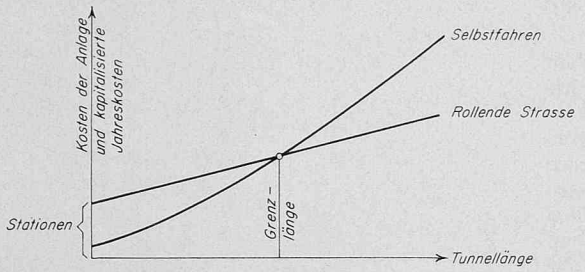


Bild 12. Schema des Kostenvergleiches

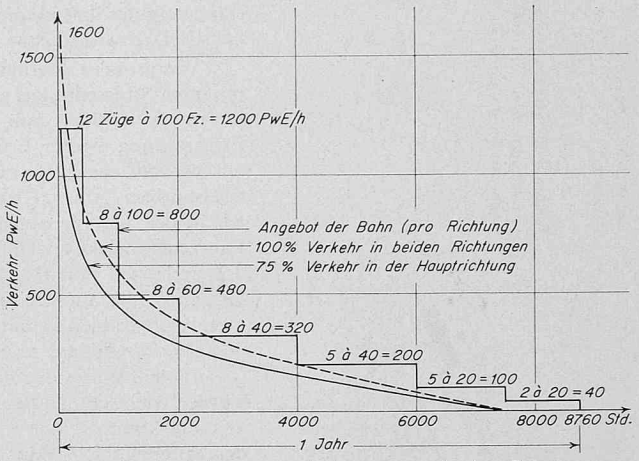


Bild 13. Dauer der Verkehrsmengen bei einer maximalen Belastung von 1600 PWE/h während 30 Stunden = 2,2 Mio Fahrzeuge pro Jahr. Annahme: Verteilung des Gesamtverkehrs zu 75 bzw. 25 % auf beide Richtungen. Anpassung des Transportangebotes an den tatsächlichen Verkehr durch Auflockerung des Fahrplanes und Reduktion der Zugslänge

- Reinigung des Verkehrsraumes und der Luftkanäle
- Baulicher Unterhalt und Erneuerung von Fahrbahn, Installationen und Dienstfahrzeugen.

Die Projektierung stellt für jeden einzelnen Fall eine Optimums-Aufgabe dar. Es ist jeweils zu entscheiden, wie viele Luftschächte und zugehörige Zentralen vorzusehen sind, die einerseits die Baukosten erhöhen aber anderseits die Lüftung erleichtern und damit die Betriebskosten verkleinern. Die Summe aller Kosten soll jeweils auf ein Minimum reduziert werden.

Bei der *rollenden Strasse* haben wir folgende Kosten zu berücksichtigen:

Anlage:
- Tunnelröhre mit Gleis, Fahrleitung und Signaleinrichtungen
- Stationen mit Rampen und Strassenanschluss
- Rollmaterial

Betrieb:
- Personal
- Energie für die Traktion
- Baulicher Unterhalt und Erneuerung von Gleis, Fahrleitung und Rollmaterial

Es wurde versucht an Personalkosten zu sparen durch eine Fernsteuerung der Züge von einer Zentrale aus. Die Züge verkehren also ohne Lokomotivführer, was angesichts des sehr einfachen Betriebes der Pendelbahn keine Schwierigkeiten bereiten sollte, verkehren doch bereits in der Pariser Métro ferngesteuerte Züge ohne Führer. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist die Traktionsenergie. Es ist daher von grosser Bedeutung, den Luftwiderstand der Züge im Tunnel möglichst herabzusetzen und auch für die Fahrgeschwindigkeit eine wirtschaftlich vertretbare Grösse zu wählen. Der Luftwiderstand wächst eben mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.

In Bild 13 ist dargestellt, wie der Bahnbetrieb dem auftretenden Verkehr angepasst werden kann. Die bei der Diskussion der einzelnen Stationstypen genannten Verkehrsmengen entsprechen der maximalen Leistungsfähigkeit der Anlage. Mit abnehmendem Verkehr wird zunächst die Zugsfolge etwas aufgelockert und später zusätzlich noch die Zugslänge herabgesetzt. Trotzdem entsteht natürlich ein gewisses Überangebot an Transportleistung, das sich in den Ecken der Treppenstufen zeigt, welche über die Dauerkurve des Verkehrs hinausgehen. Das gleiche gilt übrigens auch für die Steuerung der Ventilation im Strassentunnel, nur wird es dort binnen weniger Jahre soweit kommen, dass die Motoren stufenlos dem Bedarf angepasst werden können. Für die Regelung des Bahnbetriebes ist nicht etwa die volle, gestrichelte Dauerkurve massgebend, sondern nur 75% davon, in der Annahme, dass der Verkehr zu ¾ in der einen und zu ¼ in der Gegenrichtung sich abspielt.

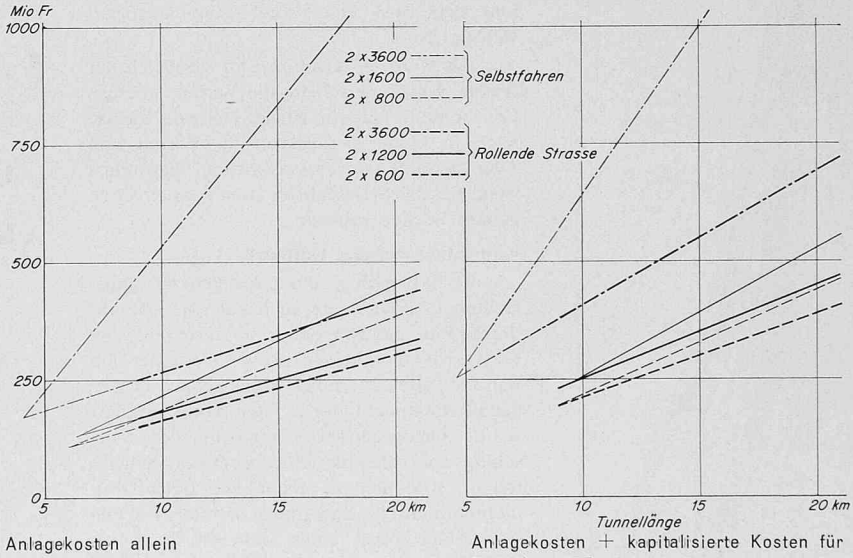
Bild 14 zeigt das erwähnte Diagramm des Kostenvergleichs, und zwar für die Anlagekosten allein sowie für die Totalkosten. Die erwarteten Schnittpunkte fallen nicht mehr in den untersuchten Längenbereich der Tunnel, sondern liegen bei etwas kleineren Tunnellängen. Die Extrapolation ist aber sehr unsicher und die Schnittpunkte sind einzig der Anschaulichkeit halber noch angedeutet. Im Falle der beiden kleineren Verkehrsmengen sind diese Schnittpunkte ziemlich schleifend, und daher ist ihre Lage empfindlich auf Ungenauigkeiten der Rechnung und auf lokale Einflüsse. Damit ist die Kostengrenze nur grössenordnungsweise festzustellen. Bei den Baukosten allein liegt sie unterhalb 7 km, und die Kostendifferenz der beiden Systeme in einem mittleren Fall von 15 km Tunnellänge und 1600 Fz/h beträgt etwa 80 Millionen Franken. Werden die Betriebskosten mitgerechnet, so verschiebt sich die Grenzlänge etwa auf 9 km und die Kostendifferenz im erwähnten mittleren Fall schrumpft auf 40 Millionen Franken zusammen. Dies kommt daher, dass in der Bahnrechnung der Transport der Fahrzeuge durch den Tunnel eingerechnet ist, während er im Falle des Selbstfahrens den einzelnen Automobilisten überlassen bleibt.

Einen Sonderfall im Kostenbereich stellt die grosse Verkehrsmenge dar. Da dort im Falle eines belüfteten Strassentunnels eine zweite Röhre vorgesehen werden muss, ist natürlich die rollende Strasse weitaus im Vorteil.

Auch hier wäre im gegebenen Fall noch zu berücksichtigen, dass der Bahntunnel, wie schon besprochen, kürzer sein kann als der entsprechende Strassentunnel.

Kriterium Sicherheit

Dieses Kriterium hilft wenig mit zur direkten Bestimmung einer Grenzlänge zwischen den beiden Systemen. Immerhin ist zum Zusammenhang zwischen Sicherheit und Tunnellänge folgendes zu sagen. Die Erfahrung zeigt, dass bei kürzeren Strassentunneln keine Schwierigkeiten auftreten, solange sie ausreichend beleuchtet und belüftet sind. Lange Zeit war man aber im ungewissen, ob nicht bei langen Tunneln Schwierigkeiten mit ängstlichen Autofahrern auftreten könnten. Im Gotthard-Beschluss der Eidg. Räte wurde deshalb die Fahrweise zunächst noch offen gelassen, um die Erfahrungen mit dem Betrieb des Mont Blanc-Tunnels abzuwarten. Aber auch dort sind unter den herrschenden Um-



Anlagekosten allein

Anlagekosten + kapitalisierte Kosten für Betrieb und Erneuerung

Bild 14. Kostenvergleich der beiden Fahrweisen (Extrapolation unterhalb 10 km nur informativ)

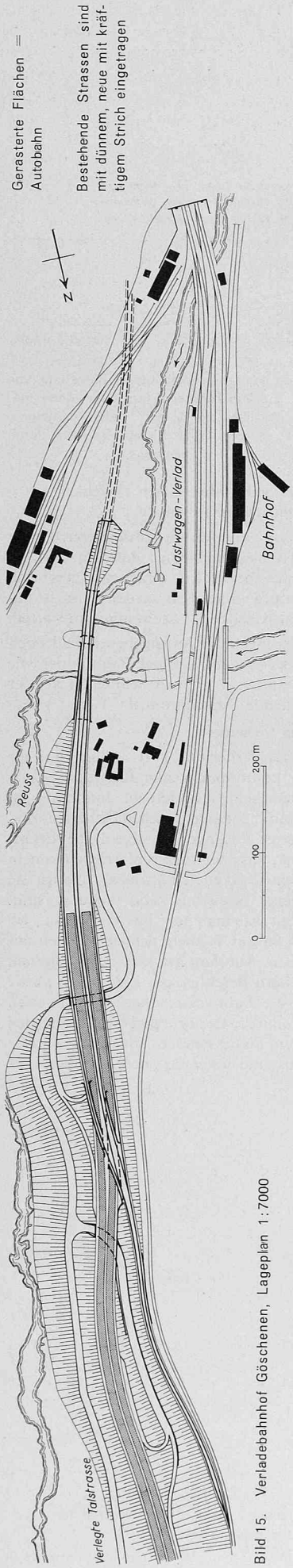


Bild 15. Verladebahnhof Göschenen, Lageplan 1:7000

ständen (guter Fahrkomfort, kleiner Verkehr) keinerlei Schwierigkeiten aufgetreten.

Wie gross ist überhaupt die Unfallgefahr in einem Strassentunnel und zwar besonders in einem solchen mit Gegenverkehr? In Ermangelung eigener Erfahrungszahlen greifen wir auf die Unfallstatistik der offenen zweispurigen Strassen zurück. Dort müssen wir in der Schweiz gegenwärtig pro Million Fahrzeug-km mit 4,5 Unfällen und dabei mit 3,2 Verletzten und 0,2 Toten rechnen. Die Ursachen, die auf den offenen Strassen für diese Unfallzahlen verantwortlich sind, würden aber im Tunnel zu etwa 60% wegfallen (Überholen, Witterungseinflüsse usw.). Dafür würden vielleicht andere Erschwernisse zur Geltung kommen, wie z. B. die Eintönigkeit der Tunnelfahrt. Man könnte daher die Unfallzahlen der offenen Strasse für den Tunnel auf etwa 50% reduzieren und müsste dann pro Million Fahrzeug-km 2,2 Unfälle, 1,6 Verletzte und 0,1 Tote erwarten. Ausländische Erfahrungen scheinen damit einigermassen übereinzustimmen (Scheldetunnel Antwerpen 3,9 Unfälle und Wagenburgtunnel Stuttgart 1,3 Unfälle).

Auf der Seite der rollenden Strasse sei zum Vergleich das Ergebnis des bisherigen Autotransportes am Gotthard herangezogen. Es sind seit Bestehen der Einrichtung 3,4 Millionen Fahrzeuge transportiert worden und zwar ohne jeglichen Unfall. Bei etwa 16 km Stationsabstand ergibt das 55 Millionen Fahrzeug-km, für welche wir nach Rechnung des Strassentunnels bereits 5 Tote zu gewärtigen gehabt hätten. Es scheint also, dass die rollende Strasse doch erheblich sicherer ist und zwar besonders bei langen Tunneln.

Zusammenfassung

Was generell erwartet, zeigt auch die genauere Untersuchung. Die rollende Strasse arbeitet bei langen Tunneln günstiger als wenn wir selber fahren. Die Grenze bezüglich Zeit liegt etwa bei 15 km, bezüglich Wirtschaftlichkeit unter 10 km. Welches der beiden Kriterien ist wichtiger? Ich selber würde die Grenze bei etwa 10 km ansetzen und dem Autofahrer die paar Minuten Verspätung zumuten. Die Fahrt durch einen Tunnel ist ja nur das erstemal eine sportliche Leistung. Nachher aber ist es gesünder, besonders bei einer Alpentraversierung, zwischenhinein einmal den Fuss eine Weile vom Gaspedal wegzunehmen.

Als weiteres Kriterium im Vergleich der beiden Systeme erscheint die Verkehrsmenge. Bei dichtem Verkehr ist die rollende Strasse auch in kürzeren Tunneln im Vorteil und zwar zeitlich und wirtschaftlich, besonders wenn für das Selbstfahren zwei Tunnelröhren gebaut werden müssen.

Anwendungsbeispiel Gotthard

Es hat mich gelockt, die generell angestellten Überlegungen auch auf einen besonderen Fall anzuwenden und zwar auf den Gotthard-Tunnel Göschenen–Airolo, der nun von der Seite des Selbstfahrens her schon sehr genau untersucht und kostenmässig studiert wurde. Demgegenüber bin ich mit dem Vorschlag der rollenden Strasse etwas benachteiligt, weil ich ja nicht ein Eisenbahnfachmann bin, so dass meine bahntechnischen Vorschläge noch eines weiteren Studiums bedürfen.

Die generelle Situation am Gotthard ist

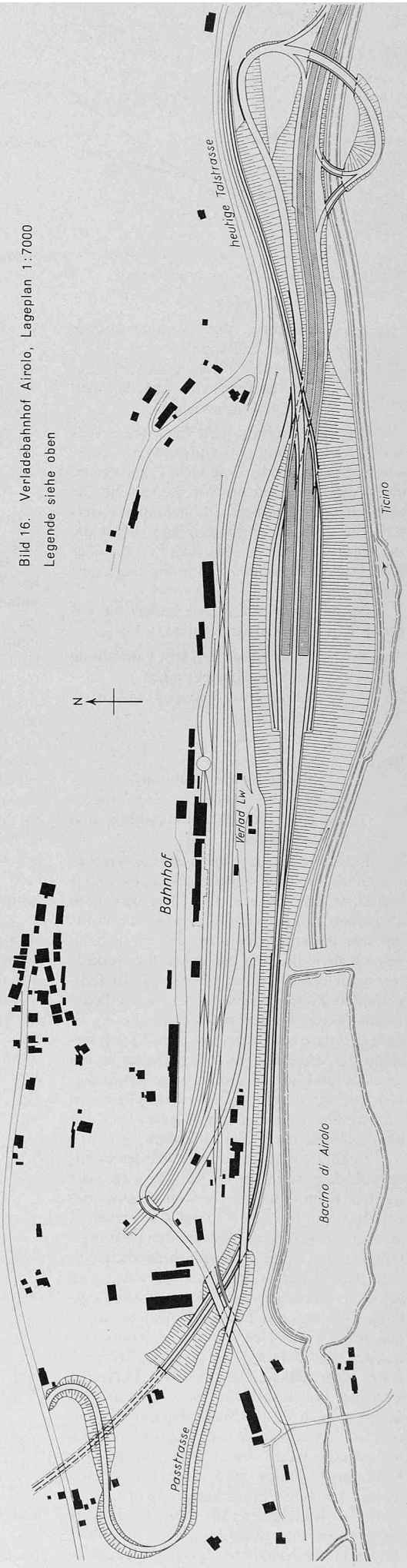


Bild 16. Verladebahnhof Airolo, Lageplan 1:7000
Legende siehe oben

etwa die folgende. Eine vierspurige Nationalstrasse führt bis zum Tunnelportal, wobei unterhalb jedes der Dörfer ein Anschluss für die Passtrasse und das Dorf zugleich anzuordnen ist. Der belüftete Strassentunnel folgt der Passenke und wird damit etwa 16 km lang. Der Tunnel für die rollende Strasse würde aus geologischen Gründen auch nicht ganz gerade gelegt und damit etwa 15,5 km lang. Er wäre etwa 15 bis 20 m tiefer anzusetzen als der gegenwärtige Bahntunnel, um Platz für die beiden Stationen zu gewinnen. Mit Rücksicht auf die spätere Verkehrszunahme ist der Stationstypus Bild 2 gewählt, dessen Ausziehgleis jeweils eine erwünschte Verbindung mit dem heutigen Bahnnetz ermöglicht.

Der Kostenvergleich ergibt etwa folgende Zahlen:

	Selbstfahren	rollende Strasse
Tunnelanlage einschl. Strassenanschlüsse	350 Mio Fr.	300 Mio Fr.
Betrieb und Erneuerung	60 Mio Fr.	90 Mio Fr.
	410 Mio Fr.	390 Mio Fr.

Die Kostendifferenz ist also nochmals zusammengeschmolzen und zwar deshalb, weil für die rollende Strasse ein leistungsfähigeres System gewählt wurde als zur Zeit eigentlich nötig wäre. Die Kostendifferenz ist auch erheblich kleiner als sie seinerzeit im Bericht der Studienkommission Gotthard berechnet worden ist. Gegenüber damals sind auf der Seite des Strassentunnels durch Verbesserung des Projektes Einsparungen erzielt worden, anderseits ist hier nun die rollende Strasse wesentlich rascher und leistungsfähiger.

Es ist aber noch zu berücksichtigen, wenigstens volkswirtschaftlich, dass die Bahnrechnung auch die Transportkosten im Tunnel einschliesst. Rechnen wir mit 15 Rp. pro km Strassenfahrt der PWE, so macht dies bei 17 km Stationsabstand etwa Fr. 2.50 aus. Der Aufwand im Jahre 1980 bei einem Transportvolumen von 2,2 Millionen Wagen würde also 5,5 Millionen Franken oder kapitalisiert 110 Millionen Franken bedeuten. Diese Zahl wäre um der Gerechtigkeit willen noch zu den Kosten des Strassentunnels hinzuzurechnen, obschon sie, solange der Tunnel gebührenfrei ist, für den Staat direkt keine Bedeutung hat. Sie entspricht trotzdem einer reellen volkswirtschaftlichen Einsparung im Falle einer rollenden Strasse.

Persönlich hätte ich also im Falle des Gotthard-Tunnels eine rollende Strasse gewählt, wegen ihrer grösseren Sicherheit, ihrer grösseren Leistungsfähigkeit und auch wegen ihrer besseren Wirtschaftlichkeit. Ich bedaure daher den Entscheid der Eidg. Räte zugunsten eines Strassentunnels. Trotzdem freue ich mich auf die grosse und technisch sehr interessante Bauaufgabe. Noch mehr aber freue ich mich auf den Basistunnel, denn das ist eigentlich auf dem Gebiet der Alpentraversierung die Aufgabe, die von unserer Generation verlangt wird, wenn wir nicht bedenklich hinter dem Wagemut unserer Vorfahren zurückstehen wollen, welche die Gotthardbahn gebaut haben. Um solches aber innert nützlicher Frist zu vollbringen, müssen Schiene und Strasse kameradschaftlich zusammenarbeiten.

Adresse des Verfassers: Prof. *H. Grob*, 8400 Winterthur, Rychenbergstrasse 106.

Nachwort

In der Tessiner Tageszeitung «Il Dovere» vom 2. März 1967 hat Giancarlo Re, dipl. Ing. SIA, GEP, den Unterzeichneten wegen seiner Haltung in der Frage des Autoverkehrs durch den Gotthard scharf und mit ehrenrührigen Ausdrücken angegriffen. Eine Veröffentlichung meiner Antwort auf diese Angriffe hat die Zeitung abgelehnt[1]). Um wenigstens den zahlreichen Lesern der SBZ im Tessin meinen Standpunkt zur Kenntnis zu bringen, veröffentliche ich nachstehend die deutsche Fassung des vom Bellinzoneser Blatt zurückgewiesenen Textes.

Der Gotthard darf kein Engpass werden!

Der Gotthard ist von jeher der wichtigste Alpenübergang, den es überhaupt gibt, und das wird er auch bleiben. Um so nötiger ist es, für den Autoverkehr die beste, in Zukunft richtige Lösung zu finden. Den Bau des Basistunnels, so nötig er ist, werde ich nicht mehr erleben, aber zwischen Airolo und Göschenen muss *unsere Generation* im Automobil jahraus, jahrein verkehren können. Hier lautet doch die Frage ganz einfach: wie legt man diese Strecke

am schnellsten
am billigsten
am sichersten
am komfortabelsten zurück?

Und die Antwort lautet eben: auf der «Rollenden Strasse». Unter diesem Ausdruck muss man sich nicht das heute am Gotthard praktizierte Verladesystem vorstellen, sondern ein neues, ausschliesslich für die Strasse konzipiertes System, völlig unabhängig von den SBB. Prof. Hans Grob hat ein solches System gezeigt. Der Tunnel liegt etwa 20 m tiefer als der heutige Bahntunnel und ist etwa 15,5 km lang. Bei Airolo und bei Göschenen sind Verladeanlagen entworfen, die je nach Bedarf ausgebaut werden können bis auf eine Leistungsfähigkeit von 3600 Fahrzeugen/h in jeder Richtung, also mindestens doppelt soviel wie der projektierte Strassentunnel. Eine künstliche Lüftung braucht der Tunnel nicht. Die Durchfahrtszeit, Einladen und Ausladen inbegriffen, ist bei starkem Verkehr etwas kleiner als für den Autotunnel. Die Bau- und Betriebskosten, inbegriffen die Spezialfahrzeuge auf den Schienen, sind, kapitalisiert, 130 Millionen Franken kleiner. Die Sicherheit ist bedeutend grösser, der Komfort ebenfalls, denn der Automobilist kann sich eine Viertelstunde lang ausruhen, statt auf einer Strecke von 16 km mit Gegenverkehr am Steuer sitzen zu müssen. Als einziger Nachteil bleibt der Umstand, dass das Auto in verkehrsschwachen Zeiten 12 Minuten auf den nächsten Zug warten muss. In den Hauptverkehrszeiten jedoch fährt alle 4 min ein Zug, und wenn das nicht genügt, kann die Anlage ausgebaut werden auf eine Zugfolge von 2 min.

Nur eine solche Lösung entspricht der Leistungsfähigkeit der vierspurigen Autobahn, die schon heute sowohl im Tessin wie im Uri bis zur Tunnelmündung gebaut wird. Was hätte es für einen Sinn, 3600 Fahrzeuge/h heranzuführen, wenn der Strassentunnel kaum 1800 pro Stunde schlucken kann? Hier liegt der Kernpunkt der Frage. Was am Bernhardin oder Montblanc genügt, kann am Gotthard nicht genügen; hier ist nur das Beste gut genug, das, was von Anfang an besser und nach Bedarf ausbaufähig ist.

Ständerat Dr. E. Choisy hat darauf hingewiesen, das die schweizerische Technik *Neues* schaffen sollte, statt sich mit dem Vervollkommnen von Vorhandenem zu begnügen (Schweiz. Bauzeitung 1967, Heft 10, S. 152 und 166. Ähnliches hat Bundesrat Celio in seiner jüngsten Rede im Tessin festgestellt). Die Gotthardfrage ist dafür typisch: statt vorhandene Lösungen, die für kurze Tunnel konzipiert wurden, dem Gotthard anzupassen, sollte man eine neue, zukunftweisende Lösung treffen (wie sie übrigens auch für den Ärmelkanaltunnel vorgesehen ist).

Zur Frage der Gebühren, die Ing. Re auch anschneidet, ist nur zu sagen, dass diese durchaus nicht vom gewählten System abhängt. Jede Art der Durchquerung des Gotthards kann mit oder ohne Gebühren erfolgen, bloss der bezügliche Entscheid ist im voraus zu treffen, weil er bauliche Konsequenzen hat.

Es stimmt, dass ich schon 1964 einen Artikel zugunsten der «Rollenden Strasse» publizieren wollte. Leider entsprach das damals vorliegende Manuskript nicht den Anforderungen, welche die Schweiz. Bauzeitung zu stellen gewohnt ist. Um so glücklicher bin ich, nunmehr die Vorlesung von Prof. Grob veröffentlichen zu können. Ich hoffe, dass seine zwingenden Überlegungen beidseits des Gotthard Gehör finden[2]).

Zusammenfassend: nicht die rollende Strasse, sondern der zweispurige Selbstfahrertunnel von 16 km Länge, mit Gegenverkehr und Lüftung nach dem Muster kurzer Tunnel, würde uns in den Augen von ganz Europa lächerlich machen, wenn dies schon ein massgebendes Kriterium ist, wie aus den Ausführungen von Ing. Re hervorzugehen scheint.

W. Jegher

[1]) Mit dieser Verletzung der Regeln des journalistischen Anstandes steht «Il Dovere» in der guten Gesellschaft der «Neuen Zürcher Zeitung». Diese hat das Manuskript von Prof. Grob nur zur Einsichtnahme erhalten, es aber vollinhaltlich abgedruckt, obwohl ihr bekannt war, dass der Verfasser das Recht der Erstveröffentlichung der «Schweiz. Bauzeitung» zugesichert hatte.

[2]) Auch die eidgenössischen Räte dürften Anlass haben, auf ihren Beschluss zugunsten eines Selbstfahrertunnels zurückzukommen, nachdem heute Unterlagen vorhanden sind, über welche man bei der Abfassung der Botschaft Nr. 9128 vom 22. Dezember 1964 noch nicht verfügte. Nur damit ist es zu erklären, dass der Verfasser der Botschaft auf S. 40 sagen kann, seine Ueberlegungen zur rollenden Strasse seien «allerdings recht summarisch», um im zweitfolgenden Satz festzustellen, ein belüfteter Strassentunnel sei vorzuziehen. Es ist ja möglich, dass diese Behauptung zutrifft, aber sie sollte eben bewiesen werden, bevor man Beschlüsse fasst. Wenn den Räten die technischen Argumente nicht genügen, dürften es doch die finanziellen sein, die heute bedeutend gewichtiger eingeschätzt werden als vor zwei Jahren.