

# **Kurzgutachten: Risikoanalyse der mit Bau und Betrieb der Zufahrtstunnels verbundenen Risiken für S21**

Hans Albrecht Schmid (Prof. Dr. Dipl.-Ing.)

basierend auf Schlichtungsvortrag  
und in Zusammenarbeit mit

Dr. Jakob Sierig

# Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurde eine Risikoanalyse für S21 Tunnels bzgl. Bau und Betrieb in Gipskeuper-Anhydrit Gesteinsformationen durchgeführt

S21 hat 4 Zufahrtstunnels, von denen jedes durch Gipskeuper-Anhydrit Gesteinsformationen fuehrt.

Diese Risiken sind schon fuer einen einzelnen Tunnel sehr hoch. Aber ein **besonderes Problem für S21** ist, dass der Bahnhof 4 problematische Zufahrtstunnels hat. Schon wenn ein einziges davon ausfällt, funktioniert der Bahnhof nicht richtig. Damit wird für S21 das ohnehin schon **sehr hohe Risiko**, das für einen **einzigsten Zufahrtstunnel** gegeben ist, stark vergrößert.

## Ergebnisse der Risikoanalyse:

**Das Risiko, dass Bauprobleme *in einem einzigen Zufahrtstunnel*** (Bau kann nicht wie geplant durchgeführt werden. Daraus resultieren Zusatzkosten und zeitliche Verzögerungen.) auftreten, **beträgt 62,5%**.

**Das Risiko, dass Betriebsschäden *in einem einzigen Zufahrtstunnel*** (Schäden, welche eine Reparatur oder Sanierung des Tunnels bedingen. Mit Vollsperrung oder Teilspernung für längere Zeit verbunden.) in einem Zeitraum von 24Jahren auftreten, **beträgt 50%**.

**Das Risiko für S21 bzgl. des Auftretens von Bauproblemen *in mindestens einem der Zufahrtstunnels*** (Bau kann nicht wie geplant durchgeführt werden. Daraus resultierende Zusatzkosten und zeitliche Verzögerung.) **beträgt 98%**.

**Das Risiko für S21 bzgl. Betriebsschäden** bei den Zufahrtstunnels (Schäden, welche eine Reparatur oder Sanierung des Tunnels bedingen. Mit Vollsperrung oder Teilspernung für längere Zeit verbunden.) innerhalb von 24Jahren **beträgt 94%**.

**Das bedeutet dass bei den S21 Zufahrtstunnels mit einer 98% Wahrscheinlichkeit Bauprobleme auftreten**, die erhebliche Zusatzkosten und zeitliche Verzögerungen beim Bau zur Folge haben, **und dass mit einer 94% Wahrscheinlichkeit in einem Zeitraum von 24Jahren Betriebsschäden auftreten**, welche eine Reparatur oder Sanierung mindestens

eines Tunnels bedingen und mit einer Vollsperrung oder Teilsperre für längere Zeit und erheblichen Zusatzkosten verbunden sind.

## **Ergebnisse der statistischen Absicherung des Bauproblem- und Betriebsschadenrisikos durch eine Konfidenzanalyse** (Definition im Detailteil):

**Das Risiko für S21 bzgl. Bauproblemen ist mit einer 90%-en Sicherheit größer als 76%.**

**Das Risiko für S21 bzgl. Betriebsschäden ist mit einer 90%-en Sicherheit Risiko größer als 72%.**

### **Folgerungen:**

**Es scheint schon mehr oder weniger grobfahrlässig, bei einem praktisch sicheren Risiko von über 76% für Bauprobleme und bzw. von über 72% für Betriebsschäden in den Zufahrtstunnels das Projekt S21 durchführen zu wollen.**

**Besonders, da es mit K21 eine Alternative gibt, welche die problematischen Zufahrtstunnels nicht benötigt.**

# **Beispielhafte Erfahrungen mit verschiedenen Tunnelbauten anhand von Zitaten aus Doktorarbeit Rauh, Presse und anderen Veröffentlichungen**

## **Chienbergtunnel, Bauprobleme**

des Gipskeupers gemessen (CHIAVERIO 2002). Den zu erwartenden Quelldrücken und -hebungen begegnete man ursprünglich mit einem kreisrunden Profil und einem druckhaltenden Ausbau mit 70 cm Betonstärke. Während der Bauausführung kam es in der ungesicherten, flachen Kalottensohle innerhalb von vier Wochen (Baustillstand wegen eines Verbruchs) zu Hebungen in der Größenordnung von 1,5 m (CHIAVERIO 2002). Im angehobenen Bereich konnte in der Sohlmitte ein etwa 15 cm breiter Riss beobachtet werden (NOHER 2002).

Als Maßnahmen gegen die quellbedingten Zerstörungen wurden daraufhin Knautschelemente in der Tunnelsohle eingebaut. Das Tunnelgewölbe wurde auf Längsbalken gestellt und diese mit den Knautschelementen starr verbunden. Momentan gehen die Hebungen unvermindert weiter, allerdings werden sie durch die Knautschelemente aufgefangen, so dass ein ordnungsgemäßer Betrieb des Tunnels zumindest in nächster Zeit gewährleistet ist (www-06).

**Der Chienbergtunnel soll Sissach vom Duchgangsverkehr entlasten, doch seit Baubeginn reiht sich eine Panne nach der anderen. Im Februar 2002 stürzte bereits der Rohbau ein. 2004 zerrissen Erdbewegungen die Tunnelwand. Nach einem enormen technischen Aufwand wurde der Chienbergtunnel doch noch vor den Festtagen 2006 fertiggestellt.**

## **Instandsetzung der Hebungsstrecke im Gipskeuper mit Knautschkörpern**

**Als dieser Tunnel 1991 vom Volk für 170 Mio. genehmigt worden ist, hätte der Laufmeter 74'000 Fr gekostet. Heute kostet das, wenn wir von 325 Mio. ausgehen 140'000 Fr pro Laufmeter!!**

## **Adlertunnel**

**Zitat Baseler Zeitung 13.10.2010:**

**Der 5,3 Kilometer lange Bahntunnel zwischen Muttenz und Liestal war 2000 nach achtjähriger Bauzeit eröffnet worden. Er unterquert den Adlerberg, der teils aus Gipskeuper besteht. Das bei Wasserkontakt aufquellende Gestein macht vielerorts Probleme; unter dem Adlerberg hat es die Tunnelsohle auf 40 Metern um bis zu sieben Zentimeter angehoben.**

### **Probleme schon beim Bau**

**Doch nicht nur das: Der Arbeitsgemeinschaft – (für Einsatz der "grösste Tunnelbohrmaschine der Welt") bestehend aus der vom Xamax-Supporter Gilbert Facchinetti präsierten Firma Infra 2000, Andrea Pitsch AG (St. Moritz), der Schmidheiny-Firma Stamm AG in Basel und der Wenk AG in Frenkendorf - steht das Wasser am Hals.**

**Gemäss einer Meldung des Wirtschaftsmagazins "Bilanz", die sich auf einen vertraulichen Bericht des Bundesamts für Verkehr (BAV) beruft, betrogen allein Ende 1996 die "unbereinigten Nachforderungen" 60 Millionen Franken. Das ist fast die Hälfte des an das Konsortium vergebenen Auftragsvolumens in Höhe von 131 Millionen Franken.**

**"Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass es grosse finanzielle Probleme gibt", bestätigt Karl Heini, Chef der Hauptabteilung Bau des SBB-Kreises 2. Die Mehrkosten beliefen sich auf eine Grössenordnung, "die für die Arbeitsgemeinschaft tatsächlich existenziell ist". Laut dem BAV-Bericht steckt das Konsortium "vermutlich in Liquiditätsproblemen". Zu den Hauptbetroffenen dürften Infra 2000 und Pitsch gehören, die je zu einem Drittel am Konsortium beteiligt sind und zusammen mit dem Hersteller Herrenknecht als Inventargemeinschaft auch Besitzer der Bohrmaschine sind.**

**Der Adlertunnel war im Dezember 2000 nach achtjähriger Bauzeit für die «Bahn 2000» eröffnet worden. Wegen der Geologie gab es beim 400-Millionen-Projekt immer wieder Probleme. So stand kurz nach Baubeginn die damals weltgrösste Tunnel-Borhmaschine für ein halbes Jahr still. Später traten auf einem 130 Meter langen Teilstück unerwartete Setzungen auf.**

**Die im Januar 2010 begonnenen Sanierungsarbeiten für 16 Millionen Franken sollten bis Ende Oktober abgeschlossen sein, wie es damals hiess. Wegen aufwändiger Betonarbeiten zur Felsbefestigung sollen die Arbeiten nun aber bis «voraussichtlich Mitte Juli 2011» dauern. Derweil bleibt nur einer der beiden Gleise im Tunnel befahrbar.**

**„Der Berg rächt sich im Adlertunnel**

**SBB brauchen mehr Zeit für Sanierung – Kosten steigen in unbekannte Höhen“  
im Adlertunnel**

***„Bei jedem neuen Juradurchstich warnen die Geologen vor dem Gipskeuper, während die Ingenieure erklären, inzwischen habe man das Problem im Griff. Das war auch beim 5,3 Kilometer langen Adlertunnel so.“***

[Gipskeuper unter der H2](#)

**Liestal, H2 - finanzielle Riesenflops im Baselbiet, die den Steuerzahler Millionen von Franken kosten. Neustes Beispiel ist die H2 zwischen Liestal und Pratteln. Im September 2006 sprach man noch von 302 Millionen – teuerungsbereinigt(!). Heute, 30 Monate später: 554 Millionen.**

## Engelbergbasistunnel

monies entspricht. Die Innenschale wird auf Querspannung von 4 MPa bemessen. Über den Bau des Engelbergbasistunnels berichten unter anderem ROCK & SCHÖMIG (1999) und BECK & THULLNER (1998). Sie beschreiben bereits ca. 10 Wochen nach Sohlschluss erste horizontale Risse am Sohlrand. Aufgrund von Wasserzutritten kam es innerhalb von wenigen Wochen auf einer Länge von ca. 230 m zu massiven Sohlhebungen von 0,1 bis 0,2 cm pro Tag. Der Versuch, die Quellhebungen mithilfe einer Niederankerung der Sohle zu unterbinden, zeigte nur geringfügige Wirkung und konnte das Abscheren der Spritzbetonschale in den Ulmenbereichen (vgl. Abb. 40, S. 67) nicht verhindern (ARGE ENGELBERG 1999). Insgesamt wurden Quellhebungen von bis zu 150 cm in den anhydritführenden Schichten des Keupers festgestellt.

Diese starken Hebungen führten zu einer Umplanung und zur Anwendung des Ausweichprinzips (s. Kap. 2.7) in der Anhydritstrecke. Der Ausbruchsquerschnitt wurde auf 330 m<sup>2</sup> vergrößert und das aufgequollene Material bis 3,5 m unter die geplante Tunnelsohle ausgeräumt. Anschließend wurde eine 1,3 m mächtige Magerbetonschicht in der Sohle eingebracht, die mit 6 m langen SN-Ankern im Raster von 1,5 x 1,5 m niedergeankert wurde. Die darauffolgende Knautschzone aus Blähton weist eine Dicke von 1,7 m auf und besitzt einen in der Sohlmitte angeordneten Kontrollgang. In diesem Kontrollgang konnten

## Heslach II -B14 Tunnel in Stuttgart

in der Tunnelsohle. Besonderes Augenmerk wurde bei diesem Tunnel auf Hebungen an der Geländeoberfläche gelegt. Es zeigten sich im Anhydritbereich, bei einer Überdeckung von 60-90 m, deutliche Geländehebungen, die 4 Jahre nach Fertigstellung etwa 2 cm ausmachten. Die Tunnelsohle hob sich in diesem Zeitraum um etwa 3 cm. Neue Messergebnisse zeigen Sohlhebungen von 7,3 cm (Messzeitraum: 1991-2004) und Geländehebungen von 4,6 cm (Messzeitraum: 1990-2002; WITTKKE 2004b).

Anmerkung: Sohlhebungen akzeptabel fuer Autotunnel, da Autos ueber Huppel fahren koennen, aber Eisenbahn entgleist schon bei geringeren Sohlhebungen

# **Abschätzung der mit Bau und Betrieb der Zufahrtstunnels verbundenen Risiken für S21**

Zur Risikoabschätzung muss von der Erfahrung mit vergleichbaren Tunnels ausgegangen werden.

Daher werden aus den in der Doktorarbeit von Rauh, 2009\* untersuchten Tunnels die acht durch Gipskeuper mit Anhydrit-Vorkommen führenden Tunnels, die in den letzten 40 Jahren (einschließlich Wagenburgtunnel), im Durchschnitt 24 Jahren gebaut wurden, als Erfahrungsbasis ausgewählt.

\* Florian Rauh, 2009: Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau; Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen; Verlag Dr. Friedrich Pfeil; 2009

## Tunnelbauten durch Gipskeuper; seit 1970 fertiggestellt – mit Wagenburgtunnel\*

Nr	Name	Baujahr	Lage	Länge m	Länge i quellf. Gestein	Bauprobleme	Betriebsschäden (Sanierung)
1(3)	Adler tunnel	1994- 2001	Liestal CH	4262	1000	keine	Groß Sanierung 2010/11
2(4)	Belchen tunnel	1963- 1970	Epfigen Jura CH	3180	1900	ja	sehr groß San. 87,98,01-03
3(8)	Chienberg tunnel	1998- 2006	Sissach CH	2300	1150	ja	bisher keine
4(10)	Engelberg basistunnel	1995- 1999	Leon- berg D	2500	450	ja	groß
5(13)	Freuden steintunnel	1985- 1991	Mannh.- Stgt D	6800	einige 100m	ja	bisher keine
6(18)	Heslach tunnel II	1986- 1988	Stgt D	1000	<1000	keine	bisher keine (Sohlhebungen 3cm + 7cm von 91-04)
7(28)	Wagenburg tunnel	1942- 1957	Stgt D	824	260	ja	groß San.1986 (auch danach Sohlhebungen 0,7cm/Jahr)
8(30)	Wendeschl. S-Bahn	1974- 1977	Stgt D	1600	weite Strecke	keine	keine

### Erläuterungen:

**Bauprobleme:** Bau konnte nicht wie geplant durchgeführt werden. Daher Zusatzmaßnahmen wie z.B. dickere Querschnitte, Erstellung von Ankern, Einbau Knautschzone o.ä. erforderlich!  
Daraus resultierende Zusatzkosten und zeitliche Verzögerung.

**Betriebsschäden:** Schäden, welche eine Reparatur oder Sanierung des Tunnels bedingen.  
Mit Vollsperrung oder Teilspernung für längere Zeit verbunden.

**Vergleichbarkeit:** Jeder in o. a. Tabelle gebauter Tunnel wurde in unterschiedlichem Gelände und mit anderen Anforderungen gebaut. Demnach sind alle Tunnels spezielle Konstruktionen und grundsätzlich nicht direkt miteinander vergleichbar.

Dennoch gibt es zwei Kriterien, die eine Vergleichbarkeit zulassen und eine statistische Erfassung des Risikos von Komplikationen im Bau und Betrieb der Tunnels rechtfertigen.

1. Alle Tunnels verlaufen durch das quellfähige Gestein des südwestdeutschen bzw. nordschweizerischen Gipskeupers.
2. Alle Tunnels wurden von Tunnelbau-Ingenieuren nach dem gegenwärtigen Stand der Technik mit dem Ziel geplant, einen Tunnel zu bauen, bei dem über Jahrzehnte keine Sanierungen notwendig werden.

\*Quelle: Doktorarbeit von Rauh, 2009

**Nicht zur Risikoanalyse herangezogene Tunnelbauten  
durch Gipskeuper; vor 1970 fertiggestellt\* – (ohne Wagenburgtunnel)**

Nr	Name	Baujahr	Lage	Länge m	Länge i quellf. Gestein	Bau probleme	Betriebsschäden (Sanierung)
9 (15)	Hauenstein tunnel	1853-1858	Olten CH	2495		ja	unklar- 1970 noch Hebungen 1,1cm/J
10 (16)	Hauenstein basistunnel	1912-1916	Olten CH	8135		ja	s.große; Sanierung 1919-23, 80-87
11 (19)	Kappeles bergtunnel	1878- 1880	Gaildorf D	415		unklar	s.große; 19 Repar., Sanierung 25-27, 67- 68,82-83
12 (24)	Schanz tunnel	1877- 1880	Fichten- berg D	860		unklar	s.große; 13 Repar., Sanierung 1994
13 (29)	Weinsber- ger Tunnel	1859- 1862	Weins- berg D	891	450	ja	s.große; ständ. Repar., Sanierung 54-59, 73-75,88-89,03-04

**Erläuterungen:**

**Bauprobleme:** Bau konnte nicht wie geplant durchgeführt werden. Daher Zusatzmaßnahmen wie z.B. dickere Querschnitte, Erstellung von Ankern, Einbau Knautschzone o.ä. erforderlich!  
Daraus resultierende Zusatzkosten und zeitliche Verzögerung.

**Betriebsschäden:** Schäden, welche eine Reparatur oder Sanierung des Tunnels bedingen.  
Mit Vollsperrung oder Teilspernung für längere Zeit verbunden.

\*Quelle: Doktorarbeit von Rauh, 2009

# Risikoanalyse von Bauproblemen anhand bestehender vergleichbarer Tunnels

## Risiko von Bauproblemen für *einen* Tunnel

Bei 5 von 8 vergleichbaren Tunnels, das heißt, bei 62,5% der vergleichbaren Tunnels, sind Bauprobleme aufgetreten, welche Zusatzmaßnahmen wie z.B. dickere Querschnitte, Erstellung von Ankern, Einbau von Knautschzonen o.ä. erforderlich machten und woraus erhebliche Zusatzkosten und zeitliche Verzögerungen resultierten.

Die aus der Erfahrung gewonnene Häufigkeit des Auftretens von Bauproblemen ist

$$h_{\text{Bauprobleme}} = 5/8 = 0,625$$

Die Häufigkeit des Auftretens von Bauproblemen ergibt die erste Näherung für die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bauproblemen. Somit ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bauproblemen, also das Bauproblemrisiko, pro Tunnel

$$p_{\text{Bauprobleme}} = 5/8 = 0,625 = 62,5\%$$

Es ist mit einer Wahrscheinlichkeit von wesentlich mehr als 50% zu erwarten, dass Probleme beim Bau eines einzigen Tunnels durch Gipskeuperschichten auftreten.

## Statistische Absicherung des Bauschadenrisikos für *einen* Tunnel

Da es nur 8 vergleichbare Tunnels gibt, statistisch ausgedrückt, da nur 8 Stichproben genommen werden konnten, ist die Frage, ob das Bauschadenrisiko in Wirklichkeit nicht viel kleiner ist und nur zufällig 5 Bauprobleme bei den 8 Stichproben dabei waren.

Dazu wird das Konfidenzintervall berechnet. Für die wegen der Anzahl von nur 8 Stichproben schwierige Berechnung, für die ich meinem Kollegen Prof. Dr. Erben ganz herzlich danke, wird die Konfidenzzahl von 90% verwendet. Dann liegt das Konfidenzintervall für  $p_{\text{Bauprobleme}}$  zwischen 0,289 und 0,889. Das bedeutet, dass der Wert für  $p_{\text{Bauprobleme}}$  mit 90% Sicherheit zwischen 0,289 und 0,889 liegt.

**Folgerung:** das Bauproblemrisiko für einen einzigen Tunnel ist mit 90% Sicherheit größer als 29% (und kleiner als 89%).

## Risiko von Bauproblemen für S21

Der Bahnhof S21 hat vier Zufahrtstunnels (die aus je zwei Röhren bestehen), die sich zu jeweils zwei auf jeder Seite nach der Ausfahrt aus dem Bahnhof verzweigen. S21 ist ganz oder teilweise funktionsunfähig wenn mindestens einer seiner Zufahrtstunnels funktionsunfähig ist. Die möglicherweise auftretenden Bauprobleme oder Betriebschäden in den Zufahrtstunnels treten voneinander unabhängig auf, da die Zufahrtstunnels durch unterschiedliches Gelände führen. Bezüglich der Wahrscheinlichkeit entspricht das vier unabhängigen Stichproben, die genommen werden.

**S21 ist ganz oder teilweise funktionsunfähig** wenn entweder einer seiner vier Zufahrtstunnels funktionsunfähig ist, oder zwei davon, oder drei davon, oder alle vier. Dies

wird durch folgende wahrscheinlichkeitstheoretische Formel quantifiziert (wobei  $p_{\text{fktunf}}$  die Wahrscheinlichkeit für die Funktionsunfähigkeit eines Zufahrtstunnels und  $p_{\text{S21 fktunf}}$  die Wahrscheinlichkeit für die Funktionsunfähigkeit von S21 bezeichnet):

$$p_{\text{S21 fktunf}} = 4 p_{\text{fktunf}} (1 - p_{\text{fktunf}})^3 + 6 p_{\text{fktunf}}^2 (1 - p_{\text{fktunf}})^2 + 4 p_{\text{fktunf}}^3 (1 - p_{\text{fktunf}}) + p_{\text{fktunf}}^4$$

Es ist ein großer Nachteil von S21, dass S21 nur dann (voll) funktionsfähig ist, wenn alle vier Zufahrtstunnels (voll) funktionsfähig sind. Dies gilt sowohl für das Auftreten von Bauproblemen wie für das von Betriebsschäden.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bauproblemen bei S21, genannt  $p_{\text{Bauprobleme S21}}$  wird berechnet, indem wir die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bauproblemen bei einem Tunnel  $p_{\text{Bauprobleme}} = 0,625$  in die obige Formel einsetzen.

Somit ist

$$p_{\text{Bauprobleme S21}} = 0.132 + 0.330 + 0.366 + 0.152 = 0.980$$

Das Risiko für das Auftreten von Bauproblemen bei S21 beträgt damit 98%.

### Konfidenzanalyse

Selbst wenn  $p_{\text{Bauprobleme}}$  mit dem Wert 0,3 an der unteren Grenze des Konfidenzintervalls liegen würde, wäre (nach der obigen Formel)

$$p_{\text{Bauprobleme S21}} = 0.760.$$

Das Bauproblemrisiko für S21 ist also mit 90% Sicherheit größer als 76%.

### Ergebnis:

Nach den bisherigen Erfahrungen mit vergleichbaren Tunnels beträgt die Wahrscheinlichkeit für Bauprobleme bei S21 98% und dieses Risiko ist mit einer 90%-en Sicherheit größer als 76%.

# **Erfahrungen mit Betriebsschäden anhand bestehender vergleichbarer Tunnels**

## **Risiko von Betriebsschäden für *einen* Tunnel**

Bei 4 von 8 vergleichbaren Tunnels, das heißt, bei 50% der vergleichbaren Tunnels sind während ihrer Lebensdauer mindestens einmal, aber auch öfters Betriebsschäden aufgetreten, welche eine Reparatur oder Sanierung des Tunnels bedingten. Reparatur oder Sanierung sind jeweils für längere Zeit mit einer Vollsperrung oder Teilspernung des Tunnels verbunden.

Eigentlich müsste man mit 5 Tunnels rechnen, da die Hebungen von etwa 10 cm beim Heselachtunnel II bei einem Bahntunnel eine Sanierung bedingt hätten. Aber wir machen eine sehr konservative (vorsichtige) Abschätzung.

Die vergleichbaren Tunnels haben insgesamt eine Betriebsdauer von 139 Jahren plus 53 Jahre für den Wagenburgtunnel, also eine durchschnittliche Betriebsdauer von 20 Jahren bzw. 24 Jahren.

Die aus der Erfahrung gewonnene Häufigkeit des Auftretens von Betriebsschäden ist

$$h_{\text{Betriebsschäden}} = 4/8 = 0,5$$

Die Häufigkeit des Auftretens von Betriebsschäden ergibt die erste Näherung für die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Betriebsschäden. Somit ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Betriebsschäden pro Tunnel für 24 Jahre Betriebsdauer, das sogenannte Betriebsschadenrisiko

$$p_{\text{Betriebsschäden}} = 4/8 = 0,5$$

## **Statistische Absicherung des Betriebsschadenrisikos**

Für die statistische Absicherung des Betriebsschadenrisikos gelten die gleichen Überlegungen wie für die statistische Absicherung des Bauproblemrisikos.

Das Konfidenzintervall wird mit der Konfidenzzahl von 90% berechnet. Für die wegen der Anzahl von nur 8 Stichproben schwierige Berechnung danke ich meinem Kollegen Prof. Dr. Erben ganz herzlich. Mit  $p_{\text{Betriebsschäden}} = 0,5$  liegt das Konfidenzintervall für  $p_{\text{Betriebsschäden}}$  zwischen 0,272 und 0,87. Das bedeutet, dass der Wert für  $p_{\text{Bauprobleme}}$  mit 90% Sicherheit zwischen 0,272 und 0,87 liegt.

Folgerung: das Betriebsschadenrisiko für einen Tunnel ist mit 90% Sicherheit größer als 27% (und kleiner als 87%).

## **Risiko von Betriebsschäden für S21**

Da S21 vier Zufahrtstunnels (die aus je zwei Röhren bestehen) hat, treten Betriebsschäden an S21 auf, das heißt, S21 ist ganz oder teilweise funktionsunfähig, wenn entweder an einem der vier Zufahrtstunnels oder an zwei davon, oder an drei davon, oder an alle vier ein Betriebsschaden auftritt. Selbst wenn nur an einer Röhre eines Tunnels ein Betriebsschaden

auftritt und damit die Sperrung einer einzigen Röhre notwendig ist, ist das mögliche Verkehrsaufkommen von S21 stark eingeschränkt.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Betriebsschäden bei S21 berechnet sich mit der für Bauprobleme angegebenen Formel:

$$p_{S21 \text{ fktunf}} = 4 p_{\text{fktunf}} (1 - p_{\text{fktunf}})^3 + 6 p_{\text{fktunf}}^2 (1 - p_{\text{fktunf}})^2 + 4 p_{\text{fktunf}}^3 (1 - p_{\text{fktunf}}) + p_{\text{fktunf}}^4$$

Mit  $p_{\text{Betriebsschäden}} = 0,5$  ist

$$p_{\text{Betriebsschäden S21}} = 0,25 + 0,375 + 0,25 + 0,0625 = 0,9375$$

Das **Risiko** für das Auftreten von Betriebsschäden **bei den Zufahrtstunnels von S21 während 24 Jahre Betriebsdauer** beträgt damit **94%**.

### Konfidenzanalyse

Selbst wenn  $p_{\text{Betriebsschäden}}$  mit dem Wert 0,27 an der unteren Grenze des Konfidenzintervalls liegen würde, wäre (nach der obigen Formel)

$$p_{\text{Betriebsschäden S21}} = 0,715.$$

Das **Betriebsschädenrisiko für S21** ist also mit 90% Sicherheit größer als 72%

### Ergebnisse:

Die **Wahrscheinlichkeit** für das Auftreten von Betriebsschäden **bei den Zufahrtstunnels von S21 während 24 Jahre Betriebsdauer** beträgt damit **94%**. Mit **90% Sicherheit** ist das **Risiko** für das Auftreten von Betriebsschäden während 24 Jahre Betriebsdauer **bei S21 größer als 72%**.

## Betriebsschäden pro Jahr

### Risiko von Betriebsschäden *pro Tunnel und Betriebsjahr*

Insgesamt sind bei den betroffenen Tunnels (mindestens) 7 große Reparatur- oder Sanierungsphasen bekannt. Somit sind bei allen 8 Tunnels 7 Betriebsschäden während einer Gesamtbetriebsdauer von 139 Jahren plus 53 Jahre gleich 192 Jahren aufgetreten. Durchschnittlich sind also mit  $7/192 = 0,04$  Schäden pro Betriebsjahr und Tunnel zu erwarten.

Das Schadensrisiko pro Betriebsjahr und Tunnel beträgt also

$$p_{\text{Betriebsschäden/Jahr}} = 0,04 = 4\%.$$

### Risiko von Betriebsschäden *pro Betriebsjahr für S21*

Da S21 vier Zufahrtstunnels (die aus je zwei Röhren bestehen) hat, treten Betriebsschäden an S21 auf und S21 ist ganz oder teilweise funktionsunfähig, wenn entweder an einem der vier Zufahrtstunnels oder an zwei davon, oder an drei davon, oder an alle vier ein Betriebsschaden auftritt. Selbst wenn nur an einer Röhre eines Tunnels ein Betriebsschaden auftritt und damit die Sperrung einer einzigen Röhre notwendig ist, ist das mögliche Verkehrsaufkommen von S21 damit stark eingeschränkt.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Betriebsschäden bei S21 pro Jahr berechnet sich mit der für Bauprobleme angegebenen Formel:

$$p_{\text{S21 fktunf}} = 4 p_{\text{fktunf}} (1 - p_{\text{fktunf}})^3 + 6 p_{\text{fktunf}}^2 (1 - p_{\text{fktunf}})^2 + 4 p_{\text{fktunf}}^3 (1 - p_{\text{fktunf}}) + p_{\text{fktunf}}^4$$

Damit ist

$$p_{\text{Betriebsschäden/Jahr S21}} = 0.142 + 0.0088 + 0.0002 + 0.000002 = 0.150$$

Das **Risiko** für das Auftreten von **Betriebsschäden an mindestens einem der Zufahrtstunnels von S21 pro Betriebsjahr** beträgt damit **15%**.