

INVESTIEREN MIT BERECHNUNG

Bauwerke gezielt verbessern

Verstärken ist oft sehr teuer. Die Norm SIA 269 erlaubt es, Kosten und Nutzen bei Erhaltungsmassnahmen zu berücksichtigen. Die erfolgreiche Anwendung bei einer Lawinengalerie zeigt eine beauftragte Expertin.

Text: Katharina Fischer



Lawinengalerie Scopi im Winter. Die Lukmanierstrasse wird nördlich der Passhöhe durch viele Lawinenzüge gefährdet. Zum Schutz des Verkehrs wurde in den 1960er-Jahren die etwa 2 km lange Lawinengalerie Scopi gebaut. Im Winter ist die Galerie zum Teil beinahe vollständig mit Schnee von Lawinniedergängen eingedeckt.

A

lle bestehenden Tragwerke auf das Sicherheitsniveau von Neubauten zu verstärken wäre aus finanziellen Gründen nicht tragbar. Stattdessen sollte man nur dort verstärken, wo der Sicherheitsgewinn die Investitionen rechtfertigt.

Mit der risikogerechten Bemessung nach Norm SIA 269 lassen sich Kosten-Nutzen-Betrachtungen in das Bemessungskonzept für bestehende Bauten integrieren. Der etwas erhöhte Projektierungsaufwand wird durch das Sparpotenzial bei den Verstärkungsmassnahmen mehr als wettgemacht. Dies zeigte sich gut beim An-

wenden auf die Lawinengalerie Scopi am Lukmanierpass. Diese in den 1960er-Jahren gebaute Galerie hat viele Lawinen schadlos überstanden. Zur Bemessung verwendete man damals für Standardgalerien geschätzte Lawineneinwirkungen. Um die Instandsetzungsmassnahmen 2014 zu planen, bestimmte man die Einwirkungen neu. Das heute übliche Vorgehen führte jedoch zu deutlich höheren Lasten. Mit dem risikobasierten Ansatz der Norm SIA 269 konnte man aber die Abschnitte der Galerie identifizieren, bei denen der Gewinn an Sicherheit die Kosten einer Verstärkung rechtfertigt.

Kosteneffizient und sicher im Bestand

Lastannahmen ändern im Lauf der Zeit, sei es wegen neuer Anforderungen oder weil neue Methoden zur Bestimmung der Bemessungswerte höhere Lasten ergeben. Die Tragsicherheit bestehender Bauten lässt sich deshalb häufig mit den aktuellen Normen nicht mehr nachweisen. Das nachträgliche Ertüchtigen ist allerdings oft sehr aufwendig, und es stellt sich die Frage, ob die Kosten der Verstärkungsmassnahmen in einem akzeptablen Verhältnis zur erreichten Sicherheit stehen. Wenn der wirtschaftliche Nutzen der Massnahmen die Kosten übersteigt, sind die Sicherheitsmassnahmen unbestritten (vgl. «Wie viel ist uns unser Leben wert», S. 26).

Die Norm SIA 269 zeigt in ihren Anhängen B und C, wie man solche Risikobetrachtungen für bestehende Bauten durchführt. Die geforderte Zuverlässigkeit hängt von den Konsequenzen eines Tragwerksversagens und der Massnahmeneffizienz (das Verhältnis von Nutzen zu Kosten der Massnahme) ab. Die Grundidee ist einfach: Je grösser die Schäden im Versagensfall und je grösser die Effizienz der Sicherheitsmassnahmen sind, desto zuverlässiger sollte das Tragwerk sein (vgl. Abb. rechts oben). Zusätzlich ist nachzuweisen, dass das individuelle Personenrisiko durch ein Tragwerksversagen kleiner ist als 10^{-5} /Jahr, im Mittel also höchstens einmal alle 100000 Jahre eintritt.

Verstärken – aber am richtigen Ort

Die Konsequenzen eines Tragwerksversagens sind bei der Galerie Scopi aufgrund des niedrigen Verkehrsaufkommens gering. Ein Verstärken des Tragwerks auf das Sicherheitsniveau der aktuellen Normen für Neubauten wäre sehr aufwendig. Deshalb lässt sich die Galerie der niedrigsten Zuverlässigkeitsklasse nach Norm SIA 269 (kleine Massnahmeneffizienz) zuweisen, in der eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit $P_f \approx 10^{-3}$ (ein Versagen alle 1000 Jahre) akzeptiert wird. Sind diese Anforderungen an die Zuverlässigkeit erfüllt, bleibt auch das Individualrisiko stets kleiner als 10^{-5} pro Jahr.

Der Zielwert des Zuverlässigkeitsindex beträgt somit für die Galerie Scopi $\beta_0 = 3.1$. Dieser Wert wird bei der Festlegung der Bemessungswerte berücksichtigt und entscheidet so, ob bzw. in welchen Abschnitten der Galerie Verstärkungsmassnahmen erforderlich sind.

Risikogerecht bemessen

Mithilfe des Zuverlässigkeitsindex β lassen sich die aktualisierten Bemessungswerte der Einwirkungen und Widerstände bestimmen: die Überprüfungswerte $E_{d,act}$ und $R_{d,act}$ gemäss SIA 269, Anhang C. Diese Werte beinhalten bereits einen gewissen Sicherheitsfaktor, der umso höher ausfällt, je grösser die Anforderungen an die Tragwerkszuverlässigkeit sind (vgl. «Sicherheitskonzept der SIA-Normen», S. 36). Die oben beschriebenen Risikobetrachtungen fliessen so direkt in die statische Nachrechnung eines bestehenden Bauwerks ein. Das Vorgehen ist auf alle Bemessungsvariablen anwendbar,

SIA 269		Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
		gering	moderat	gross
Massnahmeneffizienz	klein	$\beta_0 = 3.1$ $P_f \approx 10^{-3}$	$\beta_0 = 3.3$ $P_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$	$\beta_0 = 3.7$ $P_f \approx 10^{-4}$
	mittel	$\beta_0 = 3.7$ $P_f \approx 10^{-4}$	Steigende Zuverlässigkeit	$\beta_0 = 4.4$ $P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$
	hoch	$\beta_0 = 4.2$ $P_f \approx 10^{-5}$		$\beta_0 = 4.7$ $P_f \approx 10^{-6}$

Das risikobasierte Festlegen der Tragwerkszuverlässigkeit ist abhängig von den Konsequenzen im Versagensfall und von der Massnahmeneffizienz. Das Beurteilen der Konsequenzen basiert auf dem Verhältnis zwischen den Gesamtkosten eines Tragwerksversagens (Sach- und Personenschäden) und den Kosten zur Wiederherstellung des Tragwerks. Die Massnahmeneffizienz ist das Verhältnis zwischen dem Nutzen (der Risikoreduktion) und den Kosten der Ertüchtigungsmassnahmen. Die angegebenen jährlichen Versagenswahrscheinlichkeiten P_f ergeben sich direkt aus den in SIA 269 definierten Zielwerten für den Zuverlässigkeitsindex β . Die Anforderung für die niedrigste Zuverlässigkeitsklasse $\beta_0 = 3.1$, $P_f \approx 10^{-3}$ entspricht einem Versagen etwa alle 1000 Jahre. (Tabelle 2 aus SIA 269, Anhang B)



Die geplanten **Erhaltungsmassnahmen an der Galerie** sind sehr aufwendig. Die nötige Verstärkung des Galeriedachs und der oberen Rahmenecke (grün markiert) ist eine Folge der neuen Lastannahmen. Die Erdarbeiten verteuern die Massnahme zusätzlich.

bei der Galerie Scopi wurden nur die Lawineneinwirkungen auf diesem Weg bestimmt. Wegen der grossen Unsicherheiten bei der Modellierung hat der risikobasierte Ansatz hier das grösste Potenzial. Für die übrigen Bemessungswerte wurde der klassische Ansatz mit festen Sicherheitsfaktoren verwendet, was zu konservativeren Bemessungswerten führte als der risikobasierte Ansatz mit einem Zielzuverlässigkeitsindex von $\beta_0 = 3.1$.

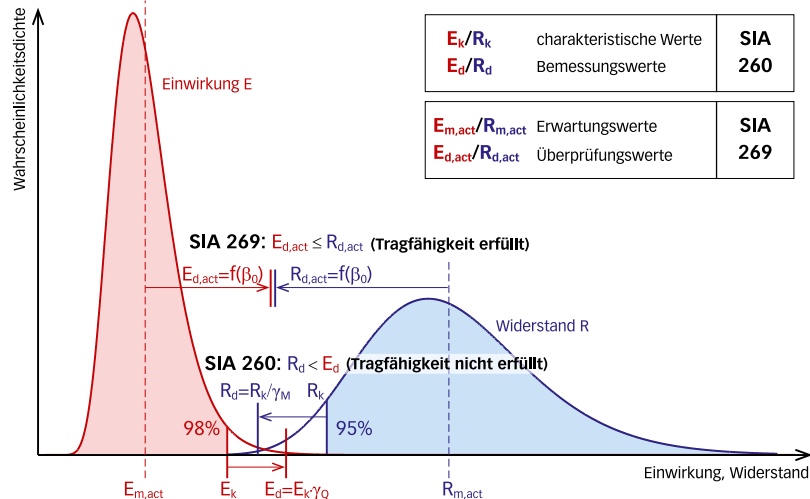
Wo die Tragsicherheit mit den aktualisierten Bemessungswerten nicht nachweisbar ist, ist das Tragwerk zu verstärken. Bei der Lawinengalerie Scopi ändert dies die Berechnung der Massnahmeneffizienz: In den Bereichen, in denen die Galerie ohnehin freigelegt wird, ist der zusätzliche Aufwand einer Verstärkung gering.

Das Sicherheitskonzept der SIA-Normen

Einwirkungen und Tragwerkswiderstände sind zufällige Grössen. Die Wahrscheinlichkeit eines Tragwerksversagens ergibt sich aus der Überlapung der beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Bei Bemessung mit den SIA-Normen liegt sie in der Grössenordnung 10^{-3} bis 10^{-6} pro Jahr, das heisst, ein Versagen im Mittel alle 1000 bis 1000000 Jahre. Im Sicherheitskonzept der SIA-Normen wird dies durch die konservative Wahl der Bemessungswerte (E resp. R) erreicht.

Im Standardkonzept der SIA-Normen (Normen SIA 260ff.) werden die Bemessungswerte E_d und R_d über die charakteristischen Werte E_k und R_k und feste Teilsicherheitsbeiwerte γ definiert. Sind die Nachweise nicht erfüllt, muss der Widerstand erhöht werden. Bei bestehenden Bauten kann eine solche Verstärkung allerdings mit beträchtlichen Kosten verbunden sein, deshalb erlaubt die Norm SIA 269 für bestehende Bauten, die Bemessungswerte für Einwirkungen und Widerstände aufgrund von Kosten-Nutzen-Betrachtungen fallspezifisch anzupassen.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Bemessungsvariablen wird durch den Erwartungswert $E_{m,act}$ bzw.



Beim risikobasierten Nachweis der Norm SIA 269 für bestehende Bauten werden die Bemessungswerte $E_{d,act}$ und $R_{d,act}$ in Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitsindex β_0 ermittelt. Je nach gefordertem Sicherheitsniveau (vgl. Abb. S. 35 oben) kann auf eine Verstärkung des Bauwerks verzichtet werden, obwohl der Nachweis nach den Neubaunormen SIA 260ff. nicht erfüllt ist ($R_d < E_d$) (vgl. Diagramm).

$R_{m,act}$, die Streuung und den Verteilungstyp (z. B. Normalverteilung) charakterisiert. Beim risikobasierten Ansatz der Norm SIA 269 werden die Bemessungswerte $E_{d,act}$ und $R_{d,act}$ in Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitsindex β_0 (vgl. Abb. S. 35 oben) direkt aus diesen Angaben

ermittelt (vgl. Anhang C der SIA 269). Ein angemessener Sicherheitsfaktor ist in den Bemessungswerten bereits enthalten. Dieser ist umso grösser, je höher die Anforderungen an die Tragwerkszuverlässigkeit gestellt werden.

Ertüchtigungsmassnahmen sind deshalb vor allem für höhere Zuverlässigkeitsklassen (geringe Konsequenzen, aber grosse Massnahmeneffizienz) zu planen.

Lawinenablagerungen als massgebende Einwirkung

Um die aktuellen Bemessungswerte festzulegen, muss deren Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt sein. Die Aufzeichnungen der Lawineneinwirkungen waren aber nicht ausreichend, deshalb wirkten Experten des Instituts für Schnee- und Lawinenforschung beim Ermitteln dieser Einwirkungen mit. Massgebend sind in der Regel die ruhenden Lawineneinwirkungen. Drei Szenarien unterschiedlicher Wiederkehrperioden führten zur Bestimmung der Ablagerungen auf der Galerie. Meist werden 30- und 300-jährige Ereignisse verwendet. Hier entschieden sich die Experten aber, die Szenarien mithilfe physikalischer Überlegungen festzulegen. Die Lawinenablagerungen für lange Wiederkehrperioden liessen sich so aus der Anzahl der Lawinenabgänge im selben Winter ermitteln.

Investitionen am falschen Ort vermeiden

Anhand der Nachrechnung mit den aktuellen Werten konnte man feststellen, in welchen Abschnitten der Galerie Verstärkungsmassnahmen erforderlich sind. Im Vergleich zum Standardkonzept der SIA-Normen

reduzierte sich die zu verstärkende Länge auf etwa ein Drittel, die risikobasierte Methode der Norm SIA 269 führte also zu beträchtlichen Einsparungen, und man konnte die Investitionen auf Bereiche beschränken, wo der Gewinn an Sicherheit in einem sinnvollen Verhältnis zu den Kosten steht. •

Katharina Fischer, Dr. sc. nat., dipl. Bauingenieurin ETH Zürich, Matrisk GmbH, Obfelden, fischer@matrisk.com

Literaturhinweise

Katharina Fischer u.a.: Reevaluation of design loads for an existing avalanche protection gallery – a probabilistic approach, IABSE Conference Geneva, 2015

Astra RL 12007: Einwirkungen infolge Lawinen auf Schutzgalerien



Bauherrschaft: Tiefbauamt Graubünden

Experten Lastmodell: Matrisk GmbH, Affoltern am Albis, 2014

Experten Lawinen: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos

Vorprojekt: Chitvanni + Wille GmbH, Chur, 2014/15

Ausführung: geplant 2017–2021