Lukas SCHROLL

# Schadwirkung von Lawinen

MASTERARBEIT

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOM-INGENIEUR

Beurteiler:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Fellin

Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau

Innsbruck, September 2015

Betreuer:
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Fellin
Universität Innsbruck, Fakultät für technische Wissenschaften
Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau

Die vorliegende Masterarbeit wurde am Institut für Naturgefahren, Abteilung für Schnee und Lawinen, des Bundesforschungszentrums für Wald in Innsbruck durchgeführt.

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Abteilung für Schnee und Lawinen
Hofburg - Rennweg 1
A - 6020 Innsbruck

# Danke...

Zunächst möchte ich mich bei meinem Mentor Wolfgang Fellin für die hervorragende Betreuung und die konstruktiven Diskussionen bedanken. Während der Bearbeitung dieser spannenden Fragestellung stand er mir stets mit Hilfestellungen und Anregungen zur Seite, welche in vielen aufregenden Ideen und neuen Denkansätzen resultierten.

Ein großes Dankeschön gilt auch Jan-Thomas Fischer und Matthias Rauter vom BFW. Durch das kritische Hinterfragen, die vielen hilfreichen Diskussionen und den Verweis auf zusätzliche adäquate Analysemethoden leisteten sie einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Für die Unterstützung beim Erlernen des Lawinensimulationsprogramms SamosAT und das Korrekturlesen möchte ich Andreas Kofler (BFW) meinen Dank aussprechen. Weiters möchte ich mich noch bei allen Mitarbeitern am BFW für die nette Zeit und die freundschaftliche Aufnahme in das Team herzlich bedanken. Ein großer Dank gilt auch dem Leiter des Instituts für Naturgefahren, Karl Kleemayr, welcher mir meinen Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt hat.

Ein herzliches Dankeschön geht an DI DI Helmuth Tschom (Statiker, Innsbruck) für seine aufgebrachte Zeit des persönlichen Interviews und die Bereitstellung der wertvollen Unterlagen von Untersuchungen des Lawinenereignisses in Galtür 1999. Bei DI Matthias Granig (WLV, Leiter der Stabstelle Schnee und Lawinen, Innsbruck) und DI Christian Weber (WLV, Gebietsbauleiter Oberes Inntal, Imst) möchte ich mich für die zur Verfügung gestellten internen Unterlagen besonders bedanken.

Bei DI Josef Kögl (Arbeitsbereich für Holzbau, Innsbruck), DI Christoph Waltl (Arbeitsbereich für Massivbau und Brückenbau, Innsbruck) und Ass.-Prof. Dr. Andreas Saxer (Arbeitsbereich Materialtechnologie, Innsbruck) möchte ich mich für die statische und materialtechnologische Unterstützung bedanken. Ein weiterer Dank gilt DI Stefan Margreth (WSL-Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos) für die Stellungnahme zum Thema Schadwirkung von Lawinen. Ao. Prof. Dr. DI Bernhard Lackinger (ehem. Mitarbeiter am Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau), wie auch Dr. Matthias Platzer (are - alpine risk engineering, Bozen) möchte ich für die von ihnen zur Verfügung gestellten Unterlagen bedanken.

Auch meiner Schwester Teresa und ihrem Lebensgefährten Peter möchte ich für das Korrekturlesen und die aufmunternden Gespräche danken. An dieser Stelle möchte ich noch all meine Freunde und Studienkollegen für die tolle Studienzeit hervorheben. Unsere gemeinsamen sportlichen Aktivitäten, Gespräche und nächtlichen Zusammenkünfte halfen mir oft die Dinge wieder von einer anderen Seite zu betrachten.

Der größte Dank gilt meinen Eltern und meiner Freundin Simone. Ihr habt mich während meiner Ausbildung in jeglicher Hinsicht unterstützt, motiviert, mir Kraft geschenkt und mich auf meinem Weg liebevoll begleitet. Danke, dass ihr immer an mich geglaubt habt. Ohne euch wäre ich nicht der Mensch, der ich heute bin.

# Kurzfassung

Um die Schadwirkung von Lawinen charakterisieren zu können wird häufig die Druckwirkung einer Lawine als Werkzeug herangezogen. Grundlegend ist dabei die Unterscheidung zwischen einem Lawinendruck und einem Zerstörungsdruck. Ersterer wird direkt aus Prozessparametern der Lawine (Schneedichte, Geschwindigkeit, etc.) bestimmt und ist abhängig von der Zeit. Im Gegensatz dazu steht der Zerstörungsdruck einer Lawine, welcher aus einem beschädigten oder intakten Objekt rückgerechnet und detailliert in dieser Masterarbeit analysiert wird. Die Berechnung eines dynamischen Druckes ist in fachspezifischen Normen, sowie publizierter Fachliteratur beschrieben und wird in dieser Arbeit erläutert. Mit der Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes beschäftigte sich in Österreich hauptsächlich DI DI Helmuth Tschom. Die von ihm unveröffentlichten Rückrechnungen wurden zusammenfassend formuliert und am Beispiel des Hauses Zangerl Paula, welches 1999 bei der Lawinenkatastrophe in Galtür komplett zerstört wurde, umfassend diskutiert. Es wurde eine Vergleichsrechnung laut aktueller Normen durchgeführt und Unsicherheiten der Rückrechnungen auf einen Zerstörungsdruck aufgezeigt. Eine im Detail untersuchte Mauerscheibe des genannten Hauses zeigt in Bezug auf die Berechnung des Zerstörungsdruckes große Varianzen. Der Grund dafür ist, dass nicht genau bekannte Materialkennwerte und Lagerungsbedingungen dieser Wandscheibe bedeutende Auswirkungen auf den zu berechnenden Zerstörungsdruck haben. Unterschiedliche Varianten der Lagerungsbedingungen dieser Wandscheibe werden mit Hilfe einer Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente analysiert. Zusätzlich wird mit dem Lawinensimulationsprogramm SamosAT eine Rückrechnung auf den dynamischen Spitzendruck gezeigt und damit ein Vergleich zu jener Methode gezogen, welche den Druck aus einem Schaden rückrechnet. Im Zuge dessen wurde festgestellt, dass die in einem Lawinensimulationsprogramm implementierten Modelle mit einem berechneten Zerstörungsdruck sehr schwer kalibriert werden können. Fazit der ausführlichen Auseinandersetzung mit diversen Rückrechnungsmethoden ist, dass der tatsächlich auftretende Zerstörungsdruck oder Lawinendruck wegen der Vielzahl an unbekannten Parametern nur sehr grob zu bestimmen ist.

# Abstract

Impact pressures of avalanches are prevalently employed to characterize the destructive potential of avalanches. Basically, it has to be distinguished between avalanche pressure and damage pressure. The former is time dependent and determined directly by avalanche parameters (e.g. snow density, velocity). In contrast, the damage pressure of an avalanche is back-calculated based on damaged and intact objects and is analyzed extensively in this master thesis. The calculation of dynamic pressure is specified in professional standards as well as in published literature and is illustrated in this work. The civil engineer Helmuth Tschom was notably engaged in the back-calculation of damage pressure in Austria. His unpublished evaluations were summarized and discussed in detail using the example of the house of Zangerl Paula, which was completely destroyed in the avalanche catastrophe of Galtür in 1999. Furthermore, a comparative analysis was performed on the basis of recent professional standards and uncertainties of back-calculations of damage pressures were highlighted. An in-depth analysis of a brick masonry wall of the mentioned building shows a high variance of the damage pressure depending on the used calculation method. This is due to the fact that the walls material properties as well as boundary conditions have a great impact on the calculated damage pressure. To model various boundary conditions of the wall the finite element method was employed. Additionally, the dynamic peak pressure was calculated using the snow avalanche simulation software SamosAT, which was important for direct comparison with the calculation results based on damage pressure. In the course of this evaluation it has been shown that it is hardly possible to calibrate the implemented models of the snow avalanche simulation software. Finally, it can be stated that various re-calculations led to the conclusion that the actual occurring damage pressure or avalanche pressure can only be roughly estimated due to the multitude of unknown parameters.

# Inhaltsverzeichnis

**Abbildungsverzeichnis** **i**

**Tabellenverzeichnis** **v**

**1 Einleitung** **1**
1.1 Motivation . . . . . 1
1.2 Ziele . . . . . 2

**2 Grundlagen** **3**
2.1 Lawinenkunde . . . . . 3
2.2 Gefahrenzonenplan . . . . . 5
2.3 Prozess- und Einwirkungsmodelle . . . . . 6
2.4 Zerstörungsdruck versus Lawinendruck . . . . . 7
2.5 Grundlagen aus der Statik . . . . . 8

**3 Einführung in die Schadwirkung von Lawinen** **11**
3.1 Allgemeines . . . . . 11
3.2 Schadensbilder . . . . . 11
3.3 Schadenspotential . . . . . 14

**4 Dynamische Einwirkungen** **19**
4.1 Fließlawine . . . . . 19
4.1.1 Fließlawinendruck normal auf ein nicht umströmtes Hindernis . . . . 19
4.1.2 Fließlawinendruck auf ein ablenkendes Hindernis . . . . . 21
4.1.3 Stauhöhe bei einem nicht umströmten Hindernis . . . . . 21
4.1.4 Fließlawinendruck auf ein umströmtes Hindernis . . . . . 22
4.1.5 Stauhöhe bei einem umströmten Hindernis . . . . . 23
4.1.6 Aufprall fester Komponenten (Steine, Bäume) . . . . . 23
4.1.7 Druck durch vertikale Umlenkung . . . . . 24
4.2 Staublawine und gemischte Bewegungsform . . . . . 24
4.3 Nassschneelawinendruck . . . . . 26
4.4 Zusammenfassung . . . . . 27

**5 Rückrechnungen auf den Zerstörungsdruck** **29**
5.1 Rückrechnungen nach Voellmy . . . . . 30
5.2 Rückrechnungen nach Tschom . . . . . 32
5.2.1 Allgemeine Beschreibung des Schadensherganges . . . . . 33
5.2.2 Berechnung der Kräfte in den Scheiben Sx1, Sx2 und Sx3 . . . . . 34
5.2.3 Berechnung des Zerstörungsdruckes . . . . . 36
5.2.4 Ergebnis der Berechnungen . . . . . 38
5.2.5 Diskussion der Rückrechnung . . . . . 38
5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Rückrechnungen nach Tschom . . . . 42
5.4 Weiteres Beispiel einer Rückrechnung - Helikopter . . . . . 59

**6 Rückrechnung auf den Zerstörungsdruck auf Basis aktueller Normen 63**
6.1 Berechnung der Wandscheibenkräfte . . . . . 63
6.2 Berechnung des Zerstörungsdruckes . . . . . 69

**7 Materialkennwerte 73**
7.1 Materialkennwerte aus der Literatur . . . . . 73
7.1.1 Mörteleigenschaften . . . . . 73
7.1.2 Ziegeleigenschaften . . . . . 75
7.2 Bestimmung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte $c$ und $\varphi$ . . . . 75
7.2.1 Herleitung der Gleichungen für die Bestimmung von $c$ und $\varphi$ . . . . 75
7.2.2 Bestimmung der einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ . . . . . 76
7.2.3 Berechnung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte $c$ und $\varphi$ für die Mauerscheibe Sx2 . . . . . 78
7.2.4 Zusammenfassung . . . . . 78

**8 Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente 81**
8.1 Eingabe . . . . . 81
8.2 Ergebnisse . . . . . 83
8.3 Rückrechnung auf den Zerstörungsdruck . . . . . 86
8.4 Zusammenfassung . . . . . 86

**9 Rückrechnung auf den dynamischen Spitzendruck 87**
9.1 Beschreibung der Wasserleiterlawine . . . . . 87
9.2 Beschreibung und Ergebnisse der Simulationen . . . . . 88
9.2.1 Simulation 01 - „Klassisch - SamosAT nach Sampl (2007)“ . . . . . 90
9.2.2 Simulation 02 - „Voellmy - SamosAT nach Sampl (2007)“ . . . . . 91
9.2.3 Simulation 03 - „Voellmy - nach Gruber et al. (1999)“ . . . . . 92
9.2.4 Simulation 04 - „CoSiCa II - Standard“ . . . . . 93
9.3 Diskussion der Simulationsergebnisse . . . . . 95

**10 Zusammenfassung der Berechnungen 97**

**11 Schlussfolgerung und Ausblick 99**

**Literaturverzeichnis 100**

# Abbildungsverzeichnis


1.1 Naturkatastrophen mit Schäden in unermesslichem Ausmaß: Lawine von Galtür, 1999 (aus: BFW, 2015); Tsunami im Indischen Ozean, 2004 (aus: UN News Centre, 2015); Erdbeben in Nepal, 2015 (aus: Zeit Online, 2015). . 1

2.1 Gefährdungsbilder aus Schneeablagerungen und Lawinen; Unterteilung des Lawinenpfades in Anbruchgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012). . . . . 3
2.2 Modell einer Mischlawine mit Schichtaufbau, beispielhaften Geschwindigkeits- und Dichteprofil und Kraftwirkungen (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012). 5
2.3 Schattenbachlawine in Walenstadt, 2003 (aus: Margreth, 2015). . . . . 7
2.4 Einwirkung auf Gebäude: Prozessmodell, Einwirkungsmodell und Schnittstelle (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012). . . . . 7
2.5 Veranschaulichung der Begriffe (a) Lawinendruck und (b) Zerstörungsdruck. 8
2.6 Prinzipskizze zur Erläuterung der Begriffe Lawinendruck und Zerstörungsdruck. . . . . 8

3.1 Schadensbilder verursacht durch eine Fließlawine: (a) Zerstörtes Wohnhaus durch große Schadlawine, Wolfsgruben-Lawine in St. Anton in Tirol, 1988 (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011); (b) Zerstörung eines Lawinenablenkbauwerks (Höhe: 9 m; Wandstärke: 1.3 m) in Taconnaz, 1999 (aus: Berthet-Rambaud et al., 2007). . . . . 12
3.2 Durch eine Fließlawine zerstörte Stettiner Hütte, 2014: (a) Front mit ausgerissener Außenmauer; (b) Westseite (aus: Platzer, 2014). . . . . 12
3.3 Schadensbilder verursacht durch eine Staublawine: (a) verstreute Gebäudeteile durch die Turbulenzen einer Staublawine; (b) Gebäude mit Schnee vollgepflastert und einige Fensterscheiben sind zerbrochen (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). . . . . 13
3.4 Schadensfall einer Staublawine (Pischürlawine, Leukerbad 1999), bei dem ein Teil des Hausdaches zerstört wurde (aus: Stoffel, 2010). . . . . 13
3.5 Waldschäden: (a) Am Nagle Creek bei Mica Creek (B.C., Kanada, 1996) ist in einer Kahlschlagfläche eine 500 m breite Lawine angebrochen und hat den darunterliegend Wald zerstört (aus: Margreth, 2004); (b) Waldschaden nach einer Lawineneinwirkung in Täsch (aus: Feistl et al., 2015). . . . . 14

4.1 Fließlawinendruck normal auf ein nicht umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 20
4.2 Fließlawinendruck auf ein ablenkendes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010). . 21
4.3 Stauhöhe bei einem nicht umströmten Hindernis (aus: ONR 24805, 2010). . 22
4.4 Fließlawinendruck auf ein umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010). . 23
4.5 Statische Ersatzlast $Q_e$ in Abhängigkeit vom Lawinendruck (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 24
4.6 Schematische Darstellung des Druckes einer Mischlawine auf ein umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 26

5.1 Schäden der Lawinenkatastrophe in Vorarlberg, 1954: (a) Mesmerhaus in Blons; (b) Haus in Sonntag (aus: Voellmy, 1955). . . . . 29
5.2 Skizze zur Abschätzung der vertikal nach oben gerichteten Kraft F. . . . . 31
5.3 Lageplan (nicht maßstäblich): Bereich Haus Zangerl Paula (aus: Tschom, 2000). . . . . 33
5.4 Obergeschoss (nicht maßstäblich): Haus Zangerl Paula und Zangerl Marlene mit den eingetragenen maßgebenden Wandscheiben für die Aufnahme des Lawinendruckes (aus: Tschom (2000), bearbeitet). . . . . 33
5.5 Schnitt (nicht maßstäblich): Haus Zangerl Paula mit farblich hinterlegter Lawineneinwirkungsfläche $A_{Ex}$ (aus: Tschom (2000),bearbeitet). . . . . 34
5.6 Prinzipskizze (nicht maßstäblich): maßgebende Wände (hellblau) zur Aufnahme der Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ (grau) zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$, unbekannte Scheibenkräfte (pink) $X_1$, $X_2$ und $X_3$ mit dargestellten Kraftanteilen aus Verschiebung $u$ und Verdrehung $\psi$ und äquivalente Wandsteifigkeiten $k_1$, $k_2$ und $k_3$ (nach: Tschom, 2000). . . . . 35
5.7 Statisches Modell eines Kragträgers (nicht maßstäblich) für das Versagen der Mauerscheibe Sx2 auf Biegung (nach: Tschom, 2000). . . . . 37
5.8 Schadensereignis in Valzur im Paznauntal, 1999 (aus: Margreth, 2015). . . . 39
5.9 Prinzipskizze (nicht maßstäblich): maßgebende Wände (hellblau) zur Aufnahme der Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ (grau) zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$, unbekannte Scheibenkräfte (pink) $X_1$ und $X_3$ mit dargestellten Kraftanteilen aus Verschiebung $u$ und Verdrehung $\psi$ und äquivalente Wandsteifigkeiten $k_1$ und $k_3$ (nach: Tschom (2000),bearbeitet). . . . 40
5.10 Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Moosbachlawine (aus: SSL, 2015). . . . 44
5.11 Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Madleinlawine (aus: SSL, 2015). . . . . 45
5.12 Ablagerungsgebiet der Madleinlawine im Bereich des Ortsgebietes Ischgl (aus: SSL, 2015). . . . . 46
5.13 Grundriss (nicht maßstäblich): Mittelstation der Kabelumlaufbahn, Staudruckverteilung am lawinenzugewandten Gebäudeteil in [kN/m$^2$] (aus: Tschom, 1984). . . . . 48
5.14 Übersichtsbilder der Schiltilawine: (a) Einzugsgebiet; (b) Lawinenauffangdämme zum Schutz der Mittelstation der Gondelbahn(aus: Tschom, 1984). . 49
5.15 Schadensbilder Schiltilawine: (a) NO-Teil der Mittelstation (lawinenzugekehrter Bereich) stark beschädigt; (b) SW-Teil der Mittelstation (lawinenabgekehrter Bereich) (aus: Tschom, 1984). . . . . 50
5.16 Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Verwalllawine (aus: SSL, 2015). . . . . 52
5.17 Lageskizze (nicht maßstäblich): Abgang der Verwalllawine in Obergurgl, 1986 (aus: Tschom, 1986). . . . . 53
5.18 Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Wolfsgrubenlawine (aus: SSL, 2015). . . 55
5.19 Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Wasserleiterlawine (aus: Tschom, 2000). 57
5.20 Schadensbilder: (a) Pension Salner; (b) total zerstörtes Haus Litzner (aus: Tschom, 2000). . . . . 58
5.21 Schadensbilder des Hauses Walter Mathias (aus: Tschom, 2000). . . . . 58
5.22 Schadensbilder des Doppelhauses Zangerl Paula und Zangerl Marlene (aus: Tschom, 2000). . . . . 58
5.23 Bilder zum Lawinenereignis in Revelstocke (British Columbia), 2014: (a) Umgeworfener und beschädigter Helikopter; (b) Helikopterlandeplatz (roter Kreis) und Ablagerungsgebiet in rot gekennzeichnet (aus: Honig et al., 2014). 59

5.24 Übersichtbild der Lawine und des Helikopterlandeplatzes (roter Pfeil)(aus: Honig et al., 2014). . . . . 60
5.25 Prinzipskizze zur Berechnung des Druckes $p$, welcher zum Umwerfen des Helikopters erforderlich war (aus: Honig et al., 2014). . . . . 61

6.1 System (nicht maßstäblich) und Belastung des Obergeschosses des Hauses Zangerl Paula (nach: Tschom, 2000; Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . 64
6.2 Graphische Darstellung der Vorgangsweise zur Bestimmung der zum Versagen führenden Horizontalkraft $H_E$: (a) Erläuterung der überdrückten Länge $l_c$, der charakteristischen Schubkraft $V_R$ und der einwirkenden Kräfte $H_E$, $N_E$ und $M_E$, sowie die zur Berechnung notwendigen Abstände (nach: Jäger, 2007; Wilhelm und Schustereder, 2010); (b) charakteristische Schubtragfähigkeit $V_R$ über der einwirkenden Horziontalkraft $H_E$ aufgetragen. . . . . 71

7.1 Festigkeit von Beton bei ebenem Spannungszustand ($\sigma_2 = 0$) (aus: Zilch und Zehetmaier, 2006). . . . . 74
7.2 Skizze zweier Geraden als Umhüllende Mohr'scher Spannungskreise für kritische Spannungszustände, wobei $\sigma_{nn}$ eine Normalspannung und $\sigma_{nt}$ eine Schubspannung bezeichnet (aus: Mang und Hofstetter, 2013). . . . . 75
7.3 Spannungsverteilungen eines vollständig plastifizierten Querschnitts mit der Breite b und einer reinen Biegebeanspruchung $M^{(0)}$, wobei in (a) die Randfasern bis maximal zur Biegezugfestigkeit $f_{tb}$ beansprucht werden und in (b) bis zur einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ bzw. Druckfestigkeit $f_c$. . . . . 77

8.1 3D - Darstellung der Vernetzung der Wandscheibe Sx2. . . . . 82
8.2 Definition der Randbedingungen am Wandfuß der Wandscheibe Sx2. . . . . 83
8.3 Maximale plastische Verzerrungen in [N/mm$^2$] der Variante 1 - unendlich steife Platte am Wandkopf. . . . . 83
8.4 Maximale plastische Verzerrungen in [N/mm$^2$] der Variante 2 - freier Rand am Wandkopf. . . . . 84
8.5 Untersuchter Starrkörper - Bruchmechanismus mit graphischer Auswertung der zum Versagen führenden Horizontalkraft am Wandkopf $H_E$. . . . . 84
8.6 Ergebnisse für die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$. . . . . 85
8.7 Einwirkende Horizontalkraft $H_E$ (Variante 1) über der Verschiebung $u_1$, bei Variation des Dilatanzwinkels $\psi$, aufgetragen. . . . . 85

9.1 Fotos des Geländes der Wasserleiterlawine: (a) Blick von Galtür in das Anbruchgebiet der Wasserleiterlawine; (b) Blick vom Anbruchgebiet der Wasserleiterlawine nach Galtür (03.07.15). . . . . 87
9.2 Eingaben in SamosAT: Anbruchgebiete (türkis dargestellt), Entrainmentfläche (gelb dargestellt) und ein exemplarisches Ergebnis einer Simulation für die dynamischen Spitzendrücke in [kPa]. . . . . 88
9.3 Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Klassisch - SamosAT nach Sampl (2007)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015). . . . . 91
9.4 Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Voellmy - SamosAT nach Sampl (2007)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015). . . . . 92

9.5 Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Voellmy - nach Gruber et al. (1999)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015). . . . . 93
9.6 Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „CoSiCa II - Standard“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015) . . . . . 94

10.1 Ergebnisse von Rückrechnungen der Zerstörungsdrücke und der dynamischen Spitzendrücke auf das Haus Zangerl Paula. . . . . 97

# Tabellenverzeichnis


2.1 Internationale Lawinenklassifikation (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 4
2.2 Lawinengeschwindigkeiten und Lawinenschneedichten (aus: Fellin, 2013). . . 5
2.3 Abgrenzung von Lawinenereignissen (aus: GZP-Richtlinien, 2011). . . . . 6

3.1 Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (nach: Sovilla et al., 2015). . . . . 15
3.2 Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Rapin, 2002). . . . . 15
3.3 Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Salm et al., 1987). . . . . 16
3.4 Klassifizierung der Lawinenintensität (Zerstörungspotential) nach Reichweite, dem Schadenspotenzial, sowie nach Kriterien der Lawinenintensität (Lauflänge Lawinenkubatur, Druckwirkung) (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). . . . . 16
3.5 Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Gabl und Lackinger, 2000). 17

4.1 Richtwerte des Koeffizienten für die turbulente Reibung $\xi$ (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 20
4.2 Richtwerte für den Reibungsbeiwert $\mu$ (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 20
4.3 Widerstandsbeiwerte $c_d$ für Fließlawinen (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 22
4.4 Reduktionsfaktor $f$ (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 23
4.5 Widerstandsbeiwerte $c_d$ für Staublawinen (aus: ONR 24805, 2010). . . . . 25
4.6 Höhen-, Längen- u. Breitenwachstum von Staublawinen (aus: Issler, 1999). . 25

5.1 Hauptdaten des Hauses Blons und Sonntag (aus: Tschom, 2000). . . . . 30
5.2 Abmessungen der Wandscheiben und Abschätzung der äquivalenten Wandsteifigkeiten (nach: Tschom, 2000). . . . . 35
5.3 Scheibenkräfte zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$ von $1\,\mathrm{kN/m^2}$ (nach: Tschom, 2000). . . . . 36
5.4 Belastungsannahmen für das Eigengewicht des Hauses Zangerl Paula $g$, Nutzlast $p$ und Schneelast $s$ (nach: Tschom, 2000). . . . . 38
5.5 Anprallwinkelvariation anhand des Beispiels Haus Zangerl Paula. . . . . 42
5.6 Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Gidis-Portrinnerlawine, Moosbachlawine und Madleinlawine (nach: Tschom, 1984). . . . . 43
5.7 Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Schiltilawine (nach: Tschom, 1984). . . . . 47
5.8 Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Verwalllawine (nach: Tschom, 1986). . . . . 51
5.9 Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Wolfsgrubenlawine (nach: Tschom, 1988). . . . . 54
5.10 Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Wasserleiterlawine (nach: Tschom, 2000). . . . . 56

6.1 Berechnung der Eingangsgrößen zur Bestimmung der Koordinate $\bar{x_0}$ des Schubmittelpunktes $M_0$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 65
6.2 Berechnung der Eingangsgrößen zur Bestimmung der Koordinate $\bar{y_0}$ des Schubmittelpunktes $M_0$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 65

6.3 Vorwerte zur Berechnung der auf die Wände entfallenden Lastanteile (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 66
6.4 Vorwerte zur Berechnung der auf die Wände entfallenden Lastanteile (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 67
6.5 Ermittlung der Kräfte in den Wandscheiben Sxi zufolge $p_0$ = 1 kN/m$^2$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 68
6.6 Ermittlung der Kräfte in den Wandscheiben Syi zufolge $p_0$ = 1 kN/m$^2$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012). . . . . 68
6.7 Abmessungen der Wandscheibe Sx2 (nach: Tschom, 2000). . . . . 69

7.1 Eigenschaften eines Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K (nach: Tschom, 2000). 73
7.2 Charakteristische Biegezugfestigkeiten von Mauermörtel (nach: ÖNORM B 3341, 1995). . . . . 73
7.3 Charakteristische Haftscherfestigkeit eines Mauerwerks (aus: ÖNORM EN 1996-1-1, 2013). . . . . 74

8.1 Verwendete Materialparameter zur Modellierung der Wandschiebe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente. . . . . 81
8.2 Zerstörungsdrücke $p_{zuf.\,Schub}$ auf das Eck Haus Zangerl Paula mit unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der zum Versagen führenden Horizontalkraft $H_E$. . . . . 86

9.1 Numerische Parameter für die Durchführung der Simulationen. . . . . 89
9.2 Standardparameter des Reibungsmodells SamosAT und weitere Annahmen für die Prozessparamter der Fließlawine (nach: Sampl, 2007; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015). . . . . 90
9.3 Standard Parameter von SamosAT für das Reibungsmodell Voellmy und weitere Annahmen für die Prozessparameter der Fließlawine (nach: Sampl, 2007; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015). . . . . 91
9.4 Parameter für das Reibungsmodell Voellmy und weitere Annahmen für die Prozessparamter der Fließlawine (nach: Gruber et al., 1999; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015). . . . . 92
9.5 Parameter für das Reibungsmodell Voellmy mit Entrainment, Parameter zur Bestimmung der Schneeverteilung und weitere Annahmen für die Prozessparameter der Fließlawine (nach: Kofler und Fischer, 2015). . . . . 94

KAPITEL 1

# Einleitung

Naturkatastrophen wie die Lawine von Galtür 1999, der Tsunami im Indischen Ozean 2004 oder das Erdbeben in Nepal 2015 verursachen Schäden in unermesslichem Ausmaß (siehe Abbildung 1.1). Deshalb ist es von großer Bedeutung die Naturprozesse und deren Auswirkungen auf das Leben und die Lebensräume besser verstehen zu lernen. Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Naturprozess Lawine und dessen Auswirkungen auf Objekte. Im Detail mit der Rückrechnung von Druckwirkungen einer Lawine auf Bauwerke.

Abbildung 1.1: Naturkatastrophen mit Schäden in unermesslichem Ausmaß: Lawine von Galtür, 1999 (aus: BFW, 2015); Tsunami im Indischen Ozean, 2004 (aus: UN News Centre, 2015); Erdbeben in Nepal, 2015 (aus: Zeit Online, 2015).

## 1.1 Motivation

Die in fachspezifischen Normen angeführten lawinendynamischen Berechnungsmethoden zur Bestimmung eines Lawinendruckes unterliegen nicht bekannten oder ungenauen Eingangsparametern und den komplexen, teilweise unbekannten physikalischen Vorgängen. Aber auch bei der Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes aus einem Objektschaden verstecken sich viele Unsicherheiten und Schwachpunkte. Fakt ist, dass viele derzeit angewandte Berechnungsmethoden grobe Vereinfachungen darstellen und die Berechnung von tatsächlich auftretenden Drücken erst in Ansätzen möglich ist. Viele Lawinenexperten und Fachleute verwenden diese genannten Ansätze und die in der Literatur angegebenen Abschätzungen von Schadenspotentialen in Abhängigkeit des Lawinendruckes, für Risikobewertungen, Bemessungen von tragenden Strukturen oder auch als Hilfsmittel zur Erstellung eines Gefahrenzonenplans. Deshalb ist es wichtig die genannten Methoden zu untersuchen und Berechnungsmodelle zu verbessern. Erweitertes Wissen bezüglich der Schadwirkung von Lawinen kann Auswirkungen auf die Konstruktion von Gebäuden in lawinengefährdeten Gebieten und auf raumplanerische Konzepte haben.

## 1.2 Ziele

Ziel dieser Masterarbeit ist es den aktuellen Wissensstand zum Thema „Schadwirkung von Lawinen“ der Österreichischen Normen, der einschlägigen Fachliteratur, sowie von Expertenmeinungen zu beleuchten und zusammenzufassen. Weiters werden die von DI DI Helmuth Tschom unveröffentlichten Rückrechnungen von Zerstörungsdrücken erhoben und aufbereitet. Anhand von expliziten Beispielen alter Rückrechnungen sollen Unsicherheiten aufzeigt, diskutiert und mit einer Berechnung nach aktuellen Normen und Literatur verglichen werden. Im Zuge dessen beschäftigt sich diese Masterarbeit mit der Beantwortung der Frage, ob man einen tatsächlich auftretenden Zerstörungsdruck akkurat berechnen kann. Zum Vergleich der Methode über ein beschädigtes Bauteil einen Druck rückzurechnen, soll ein dynamischer Spitzendruck mit einem Lawinensimulationsprogramm ermittelt werden. Auch die Abschätzung der Möglichkeit die darin implementierten Modelle mit Zerstörungsdrücken zu kalibrieren ist Teil dieser Arbeit.

KAPITEL 2

# Grundlagen

Das Kapitel 2 gibt eine kurze Einführung in die Thematiken der Lawinenkunde, Gefahrenzonenplanung, sowie der Prozess- und Einwirkungsmodelle. Weiters werden Grundbegriffe für die Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes erläutert.

## 2.1 Lawinenkunde

Gabl und Lackinger (2000) bezeichnen eine Lawine als Schneemassen, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen, in Gräben u. ä. infolge der Bewegungsenergie oder der von ihnen verursachten Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerungen Gefahren oder Schäden verursachen können. Eine Lawine entsteht im Anbruchgebiet, fließt über die Sturzbahn und kommt im Ablagerungsgebiet zum Stillstand (z. B.: Fellin, 2013). In Abbildung 2.1 ist diese Unterteilung des Lawinenpfades in drei Gebiete und die Gefährdungen einer Lawine auf Objekte veranschaulicht.

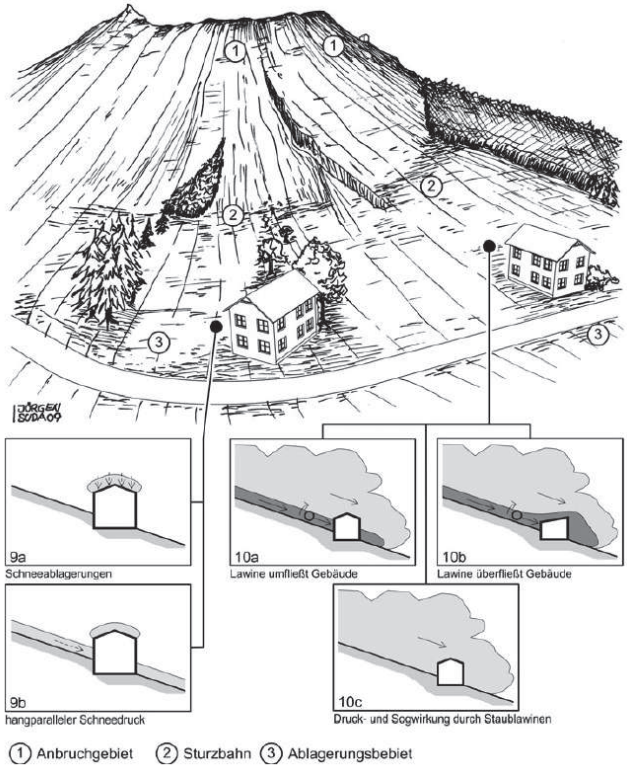



Abbildung 2.1: Gefährdungsbilder aus Schneeablagerungen und Lawinen; Unterteilung des Lawinenpfades in Anbruchgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012).

Mit Hilfe einer Lawinenklassifikation können beobachtete oder erwartete Lawinen mit einfachen und weltweit einheitlichen Begriffen beschrieben werden (Gabl und Lackinger, 2000). Die Tabelle 2.1 stellt die internationale Lawinenklassifikation nach ONR 24805 (2010) dar.

Tabelle 2.1: Internationale Lawinenklassifikation (aus: ONR 24805, 2010).

| Zone | Kriterium | Alternative Merkmale, Bezeichnung | |
|---|---|---|---|
| Anbruchgebiet | Form des Anrisses | Von einem Punkt ausgehend:<br>Lockerschneelawine | Von einer Lawine anreißend:<br>Schneebrettlawine |
| | Lage der Gleitfläche | Innerhalb der Schneedecke:<br>Oberlawine | Auf der Bodenoberfläche:<br>Bodenlawine |
| | Flüssiges Wasser im Lawinenschnee | Trocken:<br>Trockenschneelawine | Nass:<br>Nassschneelawine |
| Sturzbahn | Form der Sturzbahn | Flächig:<br>Flächenlawine | Runsenförmig:<br>Runsenlawine |
| | Form der Bewegung | Stiebend, als Schneewolke durch die Luft:<br>Staublawine | Fließend, dem Boden folgend:<br>Fließlawine |
| | | gemische Bewegungsform<br>Mischlawine | |
| Ablagerungsgebiet | Oberflächenrauhigkeit der Ablagerung | Grob (über 0.3 m):<br>Grobe Ablagerung | Fein (unter 0.3 m):<br>Feine Ablagerung |
| | Flüssiges Wasser in der Ablagerung | Trocken:<br>Trockene Ablagerung | Nass:<br>Nasse Ablagerung |
| | Fremdmaterial in der Ablagerung | Fehlend:<br>Reine Ablagerung | Vorhanden (Steine, Erde, Äste, Bäume):<br>Gemischte Ablagerung |

In diesem Zusammenhang sind auch noch die Begriffe Schadlawine und Katastrophenlawine zu definieren. Unter einer Schadlawine versteht man eine Lawine, welche bei ihrem Abgang Schäden durch dynamische Beanspruchung oder Ablagerung verursacht. Eine Katastrophenlawine bezeichnet eine Schadlawine, deren Folgen deutlich über die Ausmaße von Schadensereignissen des täglichen Lebens hinausgehen (ONR 24805, 2010).

Nach Gabl und Lackinger (2000) erreichen Lawinen, in Abhängigkeit von ihrer Dichte, Geschwindigkeit, Lawinenbahn und der Art des Hindernisses, sehr hohe Kraftwirkungen. Über dieser Parameter ist es möglich den Lawinendruck, welcher die Einwirkung des Lawinenschnees beim Auftreffen einer Lawine auf ein Hindernis darstellt, näherungsweise abzuschätzen. Die Lawine kann Schäden durch die der Lawine vorauseilenden Luftdruckwelle und zufolge der Fließschicht verursachen. In Abbildung 2.2 ist das Modell einer Mischlawine dargestellt in welcher man die Fließschicht und die Luftdruckwelle erkennen kann. Hier sieht man auch die unterschiedlichen Dichten und Geschwindigkeiten der

einzelnen Schichten einer Mischlawine. Anhaltswerte für Lawinengeschwindigkeiten und Lawinenschneedichten gibt Fellin (2013) in Tabelle 2.2 an.

Tabelle 2.2: Lawinengeschwindigkeiten und Lawinenschneedichten (aus: Fellin, 2013).

| | Lawinengeschwindigkeit | Lawinenschneedichte |
|---|---|---|
| nasse Fließlawine | 10 bis 20 m/s | 300 bis 500 kg/m$^3$ |
| trockene Fließlawine | 20 bis 40 m/s | 50 bis 300 kg/m$^3$ |
| Staublawine | 30 bis 100 m/s | 2 bis 15 kg/m$^3$ |
| | (vereinzelt 140 m/s) | |
| Mischlawine | 20 bis 50 m/s | Staubschicht: 3 bis 15 kg/m$^3$ |
| | | Saltationsschicht: 10 bis 100 kg/m$^3$ |

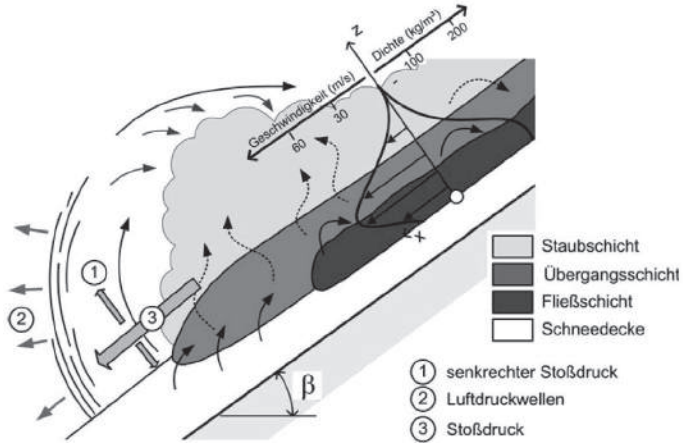



Abbildung 2.2: Modell einer Mischlawine mit Schichtaufbau, beispielhaften Geschwindigkeits- und Dichteprofil und Kraftwirkungen (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012).

## 2.2 Gefahrenzonenplan

Der Gefahrenzonenplan wurde 1975 im Forstgesetz geregelt und stellt ein flächenhaftes Gutachten mit Prognosecharakter über die Gefährdung von Siedlungen durch Wildbäche, Lawinen und allenfalls Erosion (Massenbewegungen wie Steinschlag, Rutschung, Felssturz, etc.) dar. Dieser ist die Planungsgrundlage für Schutzmaßnahmen. Nach (GZP-Richtlinien, 2011, S.29f) werden in Österreich folgende Gefahrenzonen unterschieden:

- Rote Gefahrenzone:
  *„Die Rote Gefahrenzone umfasst jene Flächen, die durch Wildbäche oder Lawinen derart gefährdet sind, dass ihre ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen des Bemessungsereignisses oder der Häufigkeit der Gefährdung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist.“*

- Gelbe Gefahrenzone:
  *„Die Gelbe Gefahrenzone umfasst alle übrigen durch Wildbäche oder Lawinen gefähr-*

*deten Flächen, deren ständige Benützung für Siedlungs- oder Verkehrszwecke infolge dieser Gefährdung beeinträchtigt ist.“*

- Blaue Vorbehaltsbereiche:
  *„Die Blauen Vorbehaltsbereiche sind Bereiche, die 1. für die Durchführung von technischen oder forstlich-biologischen Maßnahmen der Dienststellen, sowie für die Aufrechterhaltung der Funktionen dieser Maßnahmen benötigt werden, oder 2. zur Sicherung einer Schutzfunktion oder eines Verbauungserfolges einer besonderen Art der Bewirtschaftung bedürfen.“*

- Braune Hinweisbereiche:
  *„Die Braunen Hinweisbereiche sind jene Bereiche, hinsichtlich derer anlässlich von Erhebungen festgestellt wurde, dass sie vermutlich anderen als von Wildbächen und Lawinen hervorgerufenen Naturgefahren, wie Steinschlag oder nicht im Zusammenhang mit Wildbächen oder Lawinen stehende Rutschungen, ausgesetzt sind.“*

- Violette Hinweisbereiche:
  *„Die Violetten Hinweisbereiche sind Bereiche, deren Schutzfunktion von der Erhaltung der Beschaffenheit des Bodens oder Geländes abhängt.“*

Für die Abgrenzung der Gefahrenzonen wird ein Bemessungsereignis mit einer 150 - jährigen Wiederkehrwahrscheinlichkeit verwendet (GZP-Richtlinien, 2011). In bestimmten Fällen werden häufiger abgehende Lawinen bei der Erstellung des Gefahrenzonenplans berücksichtigt. Auf die Häufigkeit von Lawinenabgängen gibt die Vegetation in der Lawinenbahn Aufschluss (Gabl und Lackinger, 2000). In Tabelle 2.3 ist die Abgrenzung der Gefahrenzonen nach dem Druckkriterium dargestellt.

Tabelle 2.3: Abgrenzung von Lawinenereignissen (aus: GZP-Richtlinien, 2011).

| Kriterien | Zonen | Bemessungsereignis | Häufiges Ereignis |
|---|---|---|---|
| 1) Druck (p) | LR | $p \geq 10\,kN/m^2$ | $p \geq 10\,kN/m^2$ |
| | LG | $1 < p < 10\,kN/m^2$ | $1 < p < 10\,kN/m^2$ |

LR=Rote Gefahrenzone Lawine, LG = Gelbe Gefahrenzone Lawine

## 2.3 Prozess- und Einwirkungsmodelle

In diesem Abschnitt wird die Trennung zwischen Prozessmodell und Einwirkungsmodell definiert. Das Prozessmodell bildet das Verhalten des Naturprozesses (z.B.: Lawine) ab und die Einwirkung auf ein Gebäude aus diesem Naturprozess wird durch ein Einwirkungsmodell beschrieben. Im Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke sind solche Einwirkungsmodelle für Lawinen nicht angegeben und werden daher durch Experten festgelegt. Die in Abbildung 2.3 dargestellte Schattenbachlawine könnte mit der in Abbildung 2.4 dargestellten Vereinfachung von Prozess- und Einwirkungsmodell betrachtet werden. Diese beiden Modelle sind über eine Schnittstelle miteinander verbunden. Das Ziel ist es für die Einwirkung relevante Grundparameter an der Schnittstelle zu ermitteln. Grundparameter können Drücke, Energie, Dichte des Mediums oder Fließhöhe sein. Durch das Einwirkungsmodell kann die Interaktion des Naturprozesses mit dem Gebäude abgebildet und die Beanspruchung des Tragwerks ermittelt werden (Suda und Rudolf-Miklau, 2012).

Abbildung 2.3: Schattenbachlawine in Walenstadt, 2003 (aus: Margreth, 2015).

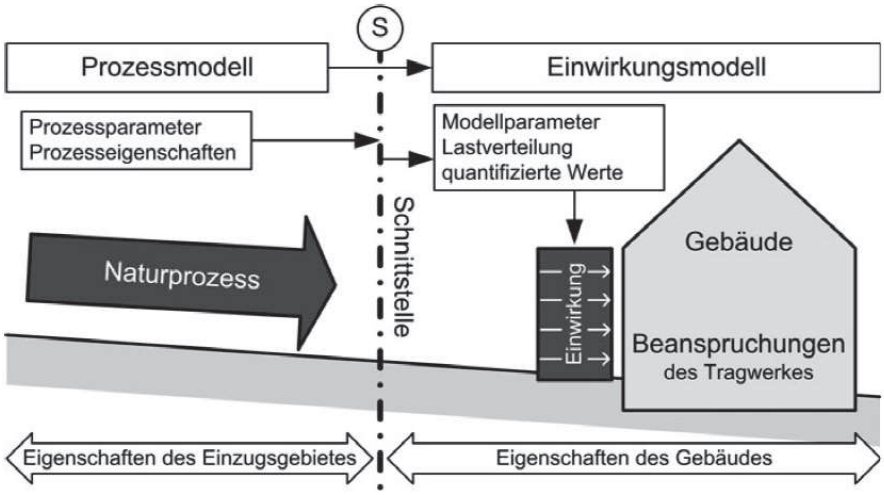



Abbildung 2.4: Einwirkung auf Gebäude: Prozessmodell, Einwirkungsmodell und Schnittstelle (aus: Suda und Rudolf-Miklau, 2012).

## 2.4 Zerstörungsdruck versus Lawinendruck

Der Lawinendruck bzw. dynamischer Druck wird aus Prozessparametern der Lawine (Schneedichte, Geschwindigkeit, etc.) ermittelt und ist abhängig von der Zeit. Deshalb wird der größte Lawinendruck an einer bestimmten Stelle als dynamischer Spitzendruck bezeichnet. Der Zerstörungsdruck hingegen wird aus dem Bauteilschaden oder einem intaktem Bauteil ermittelt. Zur Berechnung eines Zerstörungsdruckes benötigt man zum Beispiel den Versagensmechanismus, Abmessungen und Materialkennwerte des betrachteten Bauteils. In Abbildung 2.5 sind die beiden Begriffe in einer Skizze veranschaulicht.

(a) (b)

Abbildung 2.5: Veranschaulichung der Begriffe (a) Lawinendruck und (b) Zerstörungsdruck.

Sofern der Zerstörungsdruck von einem Bauteilschaden rückgerechnet wird ist der Lawinendruck größer oder gleich. Hingegen ist bei einem intakten Bauteil dieser kleiner. Die Abbildung 2.6 veranschaulicht die in diesem Abschnitt erläuterten Begriffe.

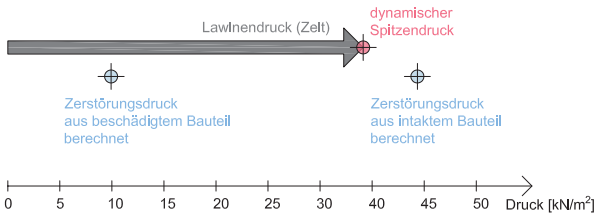



Abbildung 2.6: Prinzipskizze zur Erläuterung der Begriffe Lawinendruck und Zerstörungsdruck.

## 2.5 Grundlagen aus der Statik

Im Abschnitt 2.5 werden grundlegende Begriffe der Tragwerksplanung und Mechanik zum besseren Verständnis erläutert, welche in den darauffolgenden Kapiteln benötigt werden.

Grundsätzlich ist bei der Bemessung eines Querschnittes, Bauteils oder einer Verbindung zu zeigen, dass der Bemessungswert der Einwirkung kleiner gleich dem Bemessungswert der zugehörigen Tragfähigkeit ist (ÖNORM EN 1990, 2013). Einfach ausgedrückt spricht man von einem Bemessungswert, wenn man die Einwirkungsseite mit einem Teilsicherheitsbeiwert multipliziert und auf der Widerstandseite (Tragfähigkeit) durch einen Teilsicherheitsbeiwert teilt. In dieser Masterarbeit werden jedoch keine Bauteile bemessen, sondern aus einem beschädigten Bauteil eine Einwirkung rückgerechnet. Das bedeutet, dass man in diesem Fall nicht mit Bemessungswerten rechnet, sondern mit sogenannten charakteristischen Werten (5 % - Quantilwert). Somit wird nach ÖNORM EN 1990 (2013) über die grundlegende Gleichung

$$E_k \leq R_k \tag{2.1}$$

mit

$E_k$ charakteristischer Wert der Einwirkung
$R_k$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit

im Kapitel 5 ein Zerstörungsdruck rückgerechnet. Um die Tragfähigkeit von Trägern, Wänden und Stützen bestimmen zu können benötigt man unter anderem Widerstandsmomente und Trägheitsmomente. Die meisten Abschätzungen der genannten Parameter werden mithilfe eines rechteckigen Querschnitt gemacht. Die dazugehörigen Formeln werden jeweils in den Kapiteln direkt angegeben.

KAPITEL 3

# Einführung in die Schadwirkung von Lawinen

Das Kapitel 3 beschreibt Schäden, welche durch eine Lawine entstehen können und Schadenspotentiale einer Lawine in Abhängigkeit des Lawinendruckes aus der Literatur.

## 3.1 Allgemeines

Grundsätzlich können Schäden, die durch Schnee und Lawinen entstanden sind, in die Kategorien direkte und indirekte Schäden aufgeteilt werden. Unter direkten Schäden werden sowohl Schäden verstanden, die durch direkte Einwirkung von Lawinen oder Schneedruck und Schneelast entstanden sind, als auch zusätzliche Kosten durch intensive Schneefälle und liegengebliebenen Lawinenschnee verstanden. Als indirekte Schäden werden alle Schäden und Kosten bezeichnet, die sich aufgrund der intensiven Schneefälle, der Lawinengefahr und der Lawinenwirkung, insbesondere durch gesperrte Verkehrsachsen und Versorgungsleitungen in davon abhängigen Bereichen, ergeben (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2000).

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit direkten Schäden auf Objekte in der Sturzbahn oder im Auslaufbereich, welche durch Einwirkungen von Lawinen entstehen. Art und Umfang der Schäden sind unterschiedlich und hängen von der Art der Lawine, Lage des Objektes und Art des Objektes ab. Die Zerstörungskraft der Lawine reicht in manchen Fällen bis zur totalen Zerstörung eines Objektes (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). In Abbildung 3.1 sind zwei total zerstörte Objekte zufolge einer Lawine dargestellt.

## 3.2 Schadensbilder

Eine Lawine kann aufgrund der unterschiedlichen Formen verschiedene Schadensbilder verursachen. Die Unterscheidung, ob ein Schaden an einem Gebäude durch die Staubschicht, Übergangsschicht oder Fließschicht einer Lawine verursacht wurde, ist selten eindeutig möglich (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Suda und Rudolf-Miklau (2012) unterscheiden Schadensbilder zufolge Fließlawine, Staublawine und Eintritt von Lawinenschnee in das Gebäude:

- Schadensbilder durch Fließlawinen:
  - Bei hohen dynamischen Drücken durch eine Lawine ist die Standsicherheit eines Gebäudes gefährdet und bei extremen Belastungen droht die Zerstörung des Gebäudes (siehe Abbildungen 3.1 und 3.2).
  - Durch die mitgeführten Feststoffe und die entstehenden Reibungskräfte durch das Umfließen des Gebäudes können Schäden an der Gebäudehülle und am Tragwerk entstehen.

– Außerdem können Schäden durch die Auflast der Schneeablagerung an Außenwänden, Dächern und Geschossdecken entstehen.

(a) (b)

Abbildung 3.1: Schadensbilder verursacht durch eine Fließlawine: (a) Zerstörtes Wohnhaus durch große Schadlawine, Wolfsgruben-Lawine in St. Anton in Tirol, 1988 (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011); (b) Zerstörung eines Lawinenablenkbauwerks (Höhe: 9 m; Wandstärke: 1.3 m) in Taconnaz, 1999 (aus: Berthet-Rambaud et al., 2007).

(a) (b)

Abbildung 3.2: Durch eine Fließlawine zerstörte Stettiner Hütte, 2014: (a) Front mit ausgerissener Außenmauer; (b) Westseite (aus: Platzer, 2014).

- Schadensbilder durch Staublawine (Staubschicht):
  - Durch die Sogwirkung der Staublawine werden Schäden an auskragenden Bauteilen verursacht.
  - Der Luftdruck der Staublawine verursacht Schäden an Fenstern (gebrochene Fensterscheiben) und im Bereich des gesamten Gebäudes.
  - Aufgrund von vertikal nach oben gerichteten Kräften können Schäden am Dach entstehen. Dächer oder Dachteile können vollständig abgedeckt und abtransportiert werden (siehe Abbildung 3.4).
  - Ein weiteres Schadensbild können weit verstreute Einzelteile, besonders Holzteile bei Holzhäusern, von Gebäuden sein (siehe Abbildung 3.3 (a)).
  - Weiters können Anpflasterungen von Schnee bis in den Dachbereich verursacht werden (siehe Abbildung 3.3 (b)).

– Staublawinen können selbst bei Gegengefälle noch auf großen Strecken Schaden stiften. Nicht selten werden am Gegenhang weit bergauf geworfene Trümmer, Bäume, Steinblöcke und dergleichen beobachtet (Voellmy, 1955).

(a) (b)

Abbildung 3.3: Schadensbilder verursacht durch eine Staublawine: (a) verstreute Gebäudeteile durch die Turbulenzen einer Staublawine; (b) Gebäude mit Schnee vollgepflastert und einige Fensterscheiben sind zerbrochen (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).

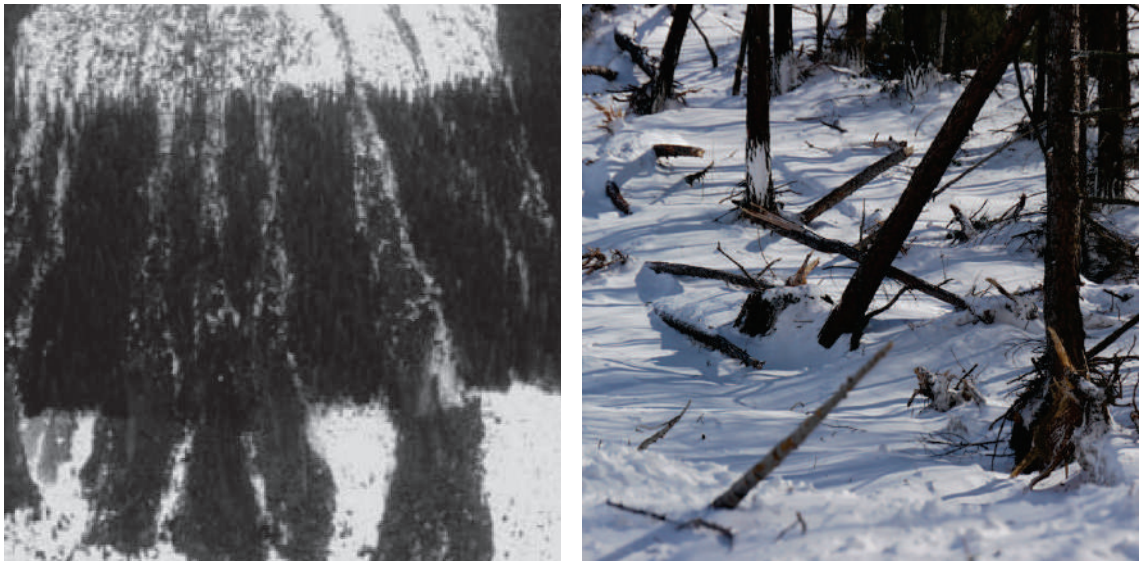
(a) (b)

Abbildung 3.4: Schadensfall einer Staublawine (Pischürlawine, Leukerbad 1999), bei dem ein Teil des Hausdaches zerstört wurde (aus: Stoffel, 2010).

- Schadensbilder durch Eintritt von Lawinenschnee in das Gebäude:
  - Durch Anprall und Auflasten können Schäden am Innenausbau und an der Einrichtung entstehen.
  - Eingedrungene Staublawinenanteile können „innere“ Explosionen verursachen.
  - Außerdem kann durch Schmelzwasser der Innenausbau und die Einrichtung beschädigt werden.

In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig die Schäden an Wäldern und Waldabschnitten zu betrachten (siehe Abbildung 3.5 (a) und (b)). Liegt das Anbruchgebiet einer Lawine oberhalb der Waldgrenze können Bäume zerstört und die Schneemassen kaum abgebremst werden. Lawinengeschwindigkeiten von 20 m/s bei einer Fließhöhe von 3 m reichen nicht aus um Bäume mit einem Stammdurchmesser von mehr als 30 cm zu brechen (sofern keine Äste erfasst werden und der Baum genügend standfest ist). Insbesondere bei Staublawinen mit Lawinendrücken von 3 bis 5 $kN/m^2$ ist die Fließhöhe einer Lawine so groß, dass die

Stämme und die Äste erfasst werden und infolge der größeren Angriffsfläche meist eine totale Zerstörung des Waldes bzw. Waldabschnittes auftritt (Margreth, 2004).



(a) (b)

Abbildung 3.5: Waldschäden: (a) Am Nagle Creek bei Mica Creek (B.C., Kanada, 1996) ist in einer Kahlschlagfläche eine 500 m breite Lawine angebrochen und hat den darunterliegend Wald zerstört (aus: Margreth, 2004); (b) Waldschaden nach einer Lawineneinwirkung in Täsch (aus: Feistl et al., 2015).

## 3.3 Schadenspotential

In der Literatur findet man verschiedene Angaben über das Schadenspotential einer Lawine in Abhängigkeit des Lawinendruckes. In den folgenden Tabellen werden näherungsweise Lawinendrücke für bestimmte Schäden angegeben. Die angeführten Tabellen 3.1 bis 3.5 sind aus Sovilla et al. (2015), Rapin (2002), Salm et al. (1987), Rudolf-Miklau und Sauermoser (2011) und Gabl und Lackinger (2000) entnommen. Alle diese Tabellen sind auf sehr alte Quellen zurückzuführen.

In einem persönlichen Interview mit dem Statiker Josef Kögl, welcher im Holzbau tätig ist, wurden diese Tabellen diskutiert.[1] Nach der Expertenmeinung von Josef Kögl muss eine übliche Hausfassade einem Faustwert von 1 kPa standhalten können. Dies stimmt mit der Angabe von 1 bis 4 kPa (vgl. Tabelle 3.2 und 3.1) für die Zerstörung von Fenstern überein. Ein übliches Holzhaus, auf welches ein Lawinendruck von 10 kPa wirkt (vgl. Tabelle 3.2), würde sehr schwer beschädigt werden und bei 30 kPa (vgl. Tabelle 3.5) wird dieses mit Sicherheit komplett zerstört.

Weiters wurde noch der schweizer Bauingenieur Stefan Margreth zur Tabelle 3.1 befragt, welche auf Arbeiten von ihm zurückzuführen ist.[2] Basierend auf seiner Expertise und Erfahrung stellen die angegebenen Lawinendrücke in Tabelle 3.1 Richtwerte dar, die um den Faktor 2 oder mehr variieren können.

[1] Persönliches Interview mit Josef Kögl, geführt in Innsbruck am 08.06.2015.
[2] Schriftliche Stellungnahme von Stefan Margreth zum Thema Schadwirkung von Lawinen, am 15.06.2015.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Größenordnungen der Werte in den hier vorgestellten Tabellen ähnliche Lawinendrücke zu den angeführten Schäden liefern. Woher diese Richtwerte genau kommen ist meist nicht klar. Aus diesem Grund und der Tatsache, dass die angegebenen Richtwerte der Lawinendrücke um einen Faktor 2 variieren können, wird die Aussagekraft dieser Tabellen als sehr niedrig eingeschätzt.

Tabelle 3.1: Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (nach: Sovilla et al., 2015).

| Lawinendruck [kPa] | Schaden |
|---|---|
| 2 bis 4 | Fenster oder schwache Türen |
| 3 bis 6 | Wände und Dächer |
| 12 bis 24 | Holzbauwerke |
| 25 bis 45 | Mauerwerke |
| ca. 100 | voll entwickelter Wald |
| $> 200$ | Versetzen großer Steinblöcke |

Tabelle 3.2: Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Rapin, 2002).

| Lawinendruck [kPa] | Lawinenart | Schaden |
|---|---|---|
| 1 bis 3 | | Zerstörung einzelner Bäume (ohne Schutzwirkung des Waldes) |
| 1 bis 4 | Staublawine | Fenster werden zerstört |
| $>5$ bis 10 | | Wald wird zerstört |
| 3 bis 6 | | Haustüren werden eingedrückt, Wände und Dächer zerstört |
| 3 | | Umwerfen eines Wagons eines Zuges (18 t) |
| 8.5 | | Umwerfen einer Lokomotive (120 t) |
| 10 | | schwere Schäden von Holzkonstruktionen |
| 20 bis 30 | Fließlawine | Zerstört Holzkonstruktionen und Bäume werden umgeworfen |
| 50 bis 100 | | Zerstört einen gut entwickelten Wald |
| 100 | | Ausreißen von großen Tannen |
| $> 300$ | | Verschieben großer Blöcke |
| 1000 | | Verschieben von bewehrten Betonkonstruktionen |

Tabelle 3.3: Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Salm et al., 1987).

| Lawinendruck [kPa] | Schaden |
|---|---|
| 1 bis 2 | Zerstörung von Fenstern und Türen |
| 3 | Umkippen von Eisenbahnwagen (18 t) |
| 8.5 | Umkippen von Lokomotiven (120 t) |
| 25 bis 45 | Zerstörung von Holzwänden in Blockbauweise |
| 12 bis 24 | Eindrücken von Wänden im Außenmauerwerk (Stein) |
| 100 | Brechen von Baumstämmen (Fließhöhe 2 bis 3 m, ohne Einbezug von Ästen) |

Tabelle 3.4: Klassifizierung der Lawinenintensität (Zerstörungspotential) nach Reichweite, dem Schadenspotenzial, sowie nach Kriterien der Lawinenintensität (Lauflänge Lawinenkubatur, Druckwirkung) (aus: Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).

| Größenordnung/ Lawinenintensität | | Klassifikation nach Reichweite | Klassifikation nach Schadenspotenzial | Klassifikation nach Lauflänge | Volumen | Druck |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | m | $m^3$ | kPa |
| 1 | sehr niedrig Schneerutsch | unbedeutende Schneeumlagerung im Hang | geringes Personenrisiko | $< 50$ | $< 100$ | $\sim 2$ |
| 2 | niedrig Kleine Lawine | kommt im Steilhangbereich (über 30°) zum Stillstand | Personenriskiko: Verschüttung und Todesopfer möglich | $< 100$ | $< 1000$ | $\sim 10$ |
| 3 | mittel Mittlere Lawine | erreicht den Fuß des Steilhanges | Zerstörungsrisiko für PKW, Schadensrisiko für LKW und kleine Bauwerke | $< 1000$ | $< 10000$ | $\sim 50$ |
| 4 | hoch Große Lawine | überwindet flachere Geländeteile (unter 30°) von mehr als 50 m erreicht den Talboden | Zerstörungsrisiko für größere Bauwerke und PKW, Personenrisiko innerhalb von Gebäuden | $> 1000$ | $< 80000$ | $\sim 200$ |
| 5 | sehr hoch Extremereignis | bis dahin unbekannte Sturzbahn und Reichweite | Totalzerstörung von großen Bauwerken und Siedlungsteilen, hohe Opferzahlen | $\gg 1000$ | bis 400000 | $\sim 500$ |

Tabelle 3.5: Schäden bei bestimmten Lawinendrücken (aus: Gabl und Lackinger, 2000).

| Lawinendruck [kPa] | Schaden |
|---|---|
| bis 1 | Fenster werden eingedrückt |
| bis 5 | Türen werden eingedrückt |
| bis 30 | Holzgebäude und gemauerte Gebäude werden eingedrückt |
| bis 100 | Bäume werden entwurzelt |
| bis 1000 | Betonkonstruktionen werden beschädigt oder zerstört |

KAPITEL 4

# Dynamische Einwirkungen

Das Kapitel 4 gibt einen Überblick über Normen und Anleitungen zur Berechnung der Kraftwirkung von Lawinen. Sämtliche in Europa bestehender Normen im Bereich des technischen Lawinenschutzes sind im Wesentlichen auf Margreth (2007) zurückzuführen (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). In Österreich legt die ONR 24805 (2010) Benennungen, Definitionen, sowie die Vorgangsweisen für die Ermittlung von dynamischen Einwirkungen fest. Daher bezieht sich das Kapitel 4 im Wesentlichen auf die ONR 24805 (2010). Auf zusätzliche Quellen wird jeweils gesondert hingewiesen. Die Ermittlung von statischen Einwirkungen auf eine unendlich lange Stützfläche, welche die ONR 24805 (2010) ebenfalls festlegt, wird in dieser Arbeit nicht diskutiert.

Bei einer Lawine handelt es sich um einen dynamischen Prozess, welcher bei Auftreffen auf ein Hindernis eine dynamische Einwirkung auf dieses verursacht. Dabei muss man unterscheiden, ob ein Hindernis umströmt oder überströmt werden kann und ob sich das Hindernis im Wirkungsbereich des Staub- oder Fließanteils einer Lawine befindet (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).

## 4.1 Fließlawine

Bei der Berechnung des Fließlawinendruckes wird grundsätzlich von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- Die Impulsübertragung erfolgt innerhalb der Fließlawine durch direkten Partikelkontakt.
- Die entstehenden Einwirkungen werden in der Regel stationär betrachtet.
- Durch den Aufprall von Schneeblöcken entstehen kurzzeitige Stoßdrücke.
- Mittransportierte Steine oder Bäume verursachen Rammeffekte.

### 4.1.1 Fließlawinendruck normal auf ein nicht umströmtes Hindernis

Bei Aufprall einer Lawine auf ein großes Hindernis, welches von der Hauptmasse der Lawine nicht umströmt wird kann ein Fließlawinendruck berechnet werden. Der Fließlawinendruck normal auf ein nicht umströmtes Hindernis $p_f$ (siehe Abbildung 4.1) ergibt sich zu:

$$p_f = \rho_f \, v_f^2 \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.1}$$

mit

$\rho_f$ Dichte der Fließlawine in [kg/m$^3$]
$v_f$ Geschwindigkeit der Fließlawine in [m/s].

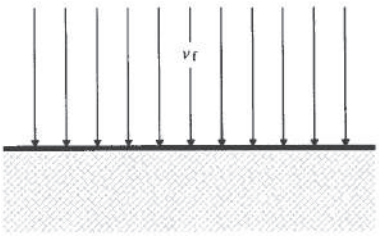



Abbildung 4.1: Fließlawinendruck normal auf ein nicht umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010).

Gruber et al. (1999) empfiehlt aus Sicherheitsgründen eine Dichte $\rho_f$ von 300 kg/m$^3$ anzunehmen. Für die Geschwindigkeit $v_f$ empfiehlt die ONR 24805 (2010) 10 m/s bis 20 m/s für eine nasse Fließlawine und 20 m/s bis 50 m/s für eine trockene Fließlawine. Weiters kann die Fließlawinengeschwindigkeit nach Voellmy (1955) zu

$$v_f = \sqrt{d_f \, \xi \, (\sin\psi - \mu \, \cos\psi)} \qquad [\mathrm{m/s}] \tag{4.2}$$

mit

- $d_f$ Mächtigkeit der Fließlawine bzw. des Fließanteiles normal zum Hang in [m]
- $\xi$ Koeffizient für die turbulente Reibung gemäß Tabelle 4.1
- $\mu$ dimensionsloser Reibungsbeiwert gemäß Tabelle 4.2
- $\psi$ Hangneigung in [°]

abgeschätzt werden. Laut Gruber et al. (1999) werden die Geschwindigkeiten von Fließlawinen in der Sturzbahn erfahrungsgemäß unterschätzt und daher sollte man man zur Berechnung von Drücken einen größeren Wert für den Koeffizienten der turbulenten Reibung $\xi$ verwenden.

Tabelle 4.1: Richtwerte des Koeffizienten für die turbulente Reibung $\xi$ (aus: ONR 24805, 2010).

| Werte für $\xi$ | Beschreibung |
|---|---|
| 1000 | flächiges Gelände bis mäßig kanalisiert, geringe Rauigkeit (Lawinenbreite zu Fließmächtigkeit größer als etwa 10:1) |
| 500 bis 600 | stark kanalisiert (Lawinenbreite zu Fließmächtigkeit etwa 1:1 bis 1:2), große Rauigkeit |
| 400 | durch Wald fließend |

Tabelle 4.2: Richtwerte für den Reibungsbeiwert $\mu$ (aus: ONR 24805, 2010).

| Werte für $\mu$ | Beschreibung |
|---|---|
| 0.155 bis 0.20 | Großlawinen (über 60000 m$^3$) |
| 0.20 bis 0.30 | mittlere Lawinen (25000 m$^3$ bis 60000 m$^3$) und kleine Lawinen (unter 25000 m$^3$) |
| 0.30 | Nassschneelawinen in allen Höhenlagen und Größenordnungen |

Aufgrund der starken Vereinfachung der Gleichung 4.1 wird der Spitzendruck $p_{peak}$, welcher während der ersten Millisekunden des Anpralles auf ein Hindernis auftreten kann, nicht berücksichtigt (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Rudolf-Miklau und Sauermoser (2011) empfehlen den zu erwartenden Spitzendruck mit

$$p_{peak} = 3\,p_f \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.3}$$

abzuschätzen und zusätzlich zum Basisdruck bei der Dimensionierung von besonders vulnerablen Gebäuden zu berücksichtigen.

### 4.1.2 Fließlawinendruck auf ein ablenkendes Hindernis

Der Fließlawinendruck auf ein ablenkendes Hindernis (Abbildung 4.2) setzt sich aus einem Normaldruck $p_n$ und einer Wandschubspannung $p_t$ zusammen (siehe Abbildung 4.2). Diese berechnen sich wie folgt:

$$p_n = \rho_f\, v_f^2\, \sin^2\alpha \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.4}$$

$$p_t = \mu\, p_n \qquad [\mathrm{N/m^2}]. \tag{4.5}$$

Der dimensionslose Reibungsbeiwert $\mu$ ist für die Kontaktfläche Schnee auf Schnee oder Schnee auf Boden mit 0.30 bzw. für Schnee auf groben Böden oder rauen Wänden mit 0.40 anzunehmen. Der Ablenkwinkel $\alpha$ ist in Abbildung 4.2 eingetragen.

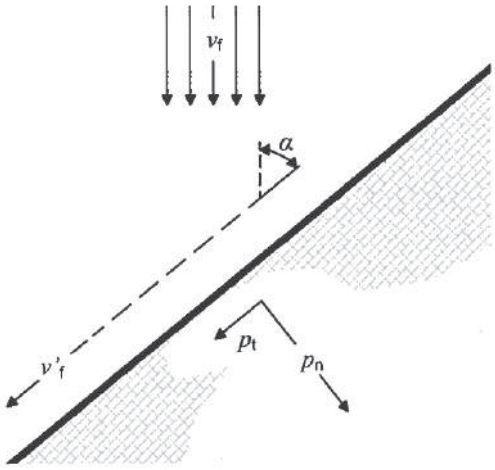



Abbildung 4.2: Fließlawinendruck auf ein ablenkendes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010).

### 4.1.3 Stauhöhe bei einem nicht umströmten Hindernis

Trifft eine Fließlawine auf ein Hindernis kommt es zu einem Rückstau innerhalb dessen der Lawinendruck linear abnimmt (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Die Stauhöhe auf ein nicht umströmtes Hindernis $h_{stau}$ (siehe Abbildung 4.3) berechnet sich mit:

$$h_{stau} = \frac{v_f^2}{2\,g\,\lambda} \qquad [\mathrm{m}]. \tag{4.6}$$

Der dimensionslose Stauhöhenkoeffizient $\lambda$ beträgt für trockene Lawinen 1.5 und für dichte (nasse) Lawinen 2 bis 3. Die Berechnung der Stauhöhe ist besonders wichtig, um die Höhe

von Auffang- oder Ablenkdämmen abzuschätzen (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Bauwerke werden auf eine totale Höhe $d_{tot}$ beansprucht. Diese setzt sich aus der Fließhöhe $h_f$ und der Stauhöhe $h_{stau}$ zusammen (siehe Abbildung 4.3). Innerhalb der Fließhöhe $h_f$ ist der Druck konstant (rechtecksförmige Belastung) und über die Staudruckhöhe $h_{stau}$ nimmt dieser linear ab (dreiecksförmige Belastung) (Gruber et al., 1999).

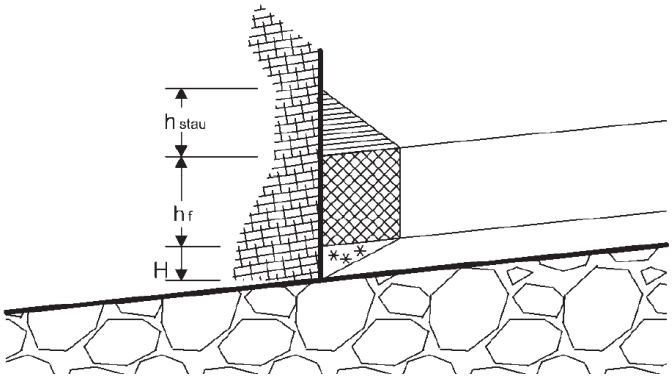



Abbildung 4.3: Stauhöhe bei einem nicht umströmten Hindernis (aus: ONR 24805, 2010).

### 4.1.4 Fließlawinendruck auf ein umströmtes Hindernis

Ein Hindernis gilt als umströmt, wenn es so klein ist, dass die Mehrzahl der Schneepartikel das Hindernis umfließen (siehe Abbildung 4.4). Dies trifft vorwiegend bei Bäumen, Liftstützen oder Masten für Energieversorgungsleitungen zu (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Der Fließlawinendruck auf ein umströmtes Hindernis $p_f$ und die resultierende Fließlawinenkraft $P_f$ errechnen sich wie folgt:

$$p_f = c_d \frac{\rho_f v_f^2}{2} \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.7}$$

$$P_f = A\, c_d \frac{\rho_f v_f^2}{2} \qquad [\mathrm{N}]. \tag{4.8}$$

Dabei ist $c_d$ ein dimensionsloser Widerstandskoeffizient, welcher in Tabelle 4.3 angegeben ist und $A$ die Projektionsfläche eines Hindernisses auf die Ebene normal zur Anströmrichtung.

Tabelle 4.3: Widerstandsbeiwerte $c_d$ für Fließlawinen (aus: ONR 24805, 2010).

| Form | Schneeart | |
|---|---|---|
| | trocken | nass |
| Kreiszylinder | 1.5 | 3 bis 5 |
| Rechteck | 2 | 4 bis 6 |
| Spaltkeil | 1.5 | 3 bis 6 |

Wird ein rechteckiges Hindernis umströmt, so ist auf den lawinenparallelen Seiten ein Lawinendruck mit einem Anströmwinkel von $\alpha = 20\ °$ nach Gleichung 4.4 zu berechnen und anzusetzen. Der Anströmwinkel ist in diesem Fall dem Ablenkwinkel gleichzusetzen.

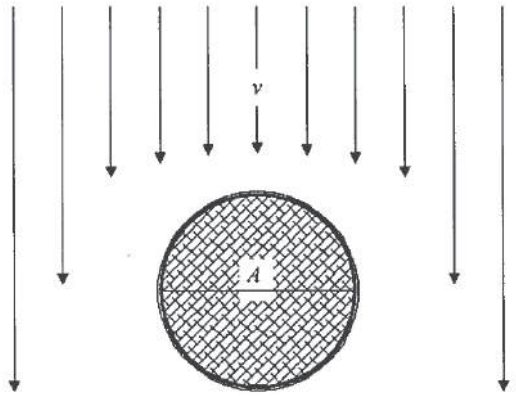



Abbildung 4.4: Fließlawinendruck auf ein umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010).

### 4.1.5 Stauhöhe bei einem umströmten Hindernis

Die Stauhöhe $h_{stau}$ auf ein umströmtes Hindernis ergibt sich zu:

$$h_{stau} = \frac{v_f^2}{2\,g\,\lambda}\, f\left(\frac{b}{d_f}\right) \qquad [\mathrm{m}] \tag{4.9}$$

mit

- $f$ dimensionsloser Reduktionsfaktor, abhängig von $\frac{b}{d_f}$ gemäß Tabelle 4.4
- $b$ Breite eines Hindernisses normal zur Anströmrichtung in [m]
- $d_f$ Mächtigkeit der Fließlawine bzw. des Fließanteils normal zum Hang in [m].
- $g$ Erdbeschleunigung mit $9.81\,\mathrm{m/s^2}$

Tabelle 4.4: Reduktionsfaktor $f$ (aus: ONR 24805, 2010).

| $\frac{b}{d_f}$ | 0.1 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | $\geq 3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $f$ | 0.1 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 1 |

Die Stauhöhen bei einem umströmten Hindernis müssen nach Gruber et al. (1999) kritisch überprüft werden und bei Bedarf mit einem größeren Stauhöhenkoeffizient angepasst werden.

### 4.1.6 Aufprall fester Komponenten (Steine, Bäume)

In Lawinen werden häufig feste Komponenten wie Steine, Eisknollen oder Bäume mitgeführt. Durch das Auftreffen auf ein Hindernis verursachen diese kurzzeitige Stoßdrücke, welche wesentlich größer sein können als die stationären Drücke. Aus diesem Grund muss eine statische Ersatzlast für Anprallkräfte (siehe Abbildung 4.5) in Form einer Einzelkraft $Q_e$ auf die lawinenseitige Wand angesetzt werden. Es wird eine kreisförmige Anprallfäche mit einem Durchmesser von 25 cm angenommen. Die Einzelkraft ist zusätzlich mit der Belastung $p_f$ der Lawine anzunehmen und ist an der statisch ungünstigsten Stelle anzusetzen.

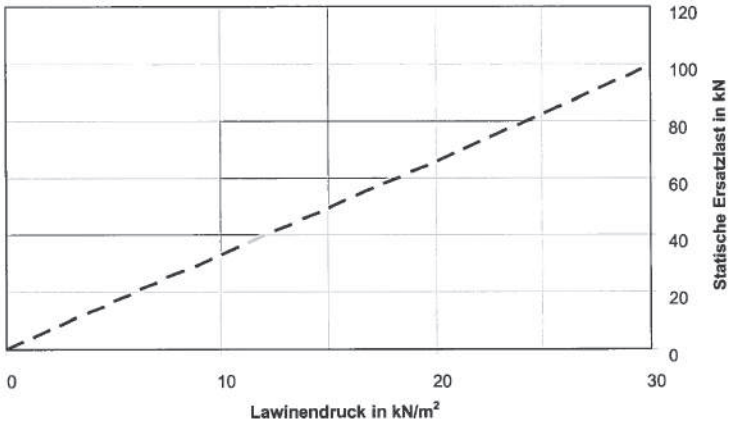



Abbildung 4.5: Statische Ersatzlast $Q_e$ in Abhängigkeit vom Lawinendruck (aus: ONR 24805, 2010).

### 4.1.7 Druck durch vertikale Umlenkung

Bei der vertikalen Umlenkung von Fließlawinen durch Galerien oder Gebäude wird zusätzlich zur Schnee- bzw. Lawinenauflast der Druck durch die vertikale Umlenkung $q_u$ wie folgt ermittelt:

$$q_u = \frac{\rho_f \, d_f \, v_f^2 \sin \delta}{l_u} \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.10}$$

mit

$l_u$ Umlenkstrecke; wird mit $6\,d_f$ angenommen in [m]
$\delta$ vertikaler Umlenkwinkel in [°].

Nach Rudolf-Miklau und Sauermoser (2011) ergeben Untersuchungen aus der Schweiz, dass die Länge der Umlenkstrecke von der Mächtigkeit der Fließlawine $d_f$ abhängig ist und auf einer Länge von $6\,d_f$ in Rechnung zu stellen ist.

## 4.2 Staublawine und gemischte Bewegungsform

Der Staublawinendruck ist abhängig von der Dichte und Geschwindigkeit des Schnee-Luft-Gemisches, welches sehr inhomogen ist. Nach Rudolf-Miklau und Sauermoser (2011) ist die Druckverteilung in der Längs- und Querrichtung einer Staublawine sehr unregelmäßig und auf struktur-, turbulenz- und topographisch bedingte Druckunterschiede zurückzuführen. Turbulente Spitzendrücke können um einen Faktor 2 über den Mittelwerten liegen. Die Berechnung des Staublawinendruckes erfolgt in Anlehnung an die Berechnung des Fließlawinendruckes unter Abschnitt 4.1, wobei noch folgende zusätzliche Effekte für um- bzw. überströmte Hindernisse zu beachten sind:

- Der Staudruck nach Gleichung 4.7 nimmt von der Mitte des Hindernisses zu dessen Rändern hin ab. Dieser hängt vom Widerstandskoeffizienten $c_d$ für Staublawinen ab (siehe Tabelle 4.5). Der Widerstandskoeffizient $c_d$ wiederum hängt von der Form und Orientierung des Gebäudes zur Fließrichtung ab. Aufgrund der großen Unsicherheiten sieht die ONR 24805 (2010) keine Berücksichtigung eines Staudruckkoeffizienten vor, weshalb dieser generell mit 1 anzunehmen ist (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).

Tabelle 4.5: Widerstandsbeiwerte $c_d$ für Staublawinen (aus: ONR 24805, 2010).

| Form | Werte für $c_d$ | |
|---|---|---|
| | Staubschicht | Saltationsschicht |
| Kreiszylinder | 1 | 1 |
| Rechteck | 1.5 | 2 |
| Spaltkeil | 1.2 | 1.5 |

- An allen lawinenabgewandten Seiten eines Hindernisses (auch Dachflächen) bildet sich ein dynamischer Unterdruck (Sog) aus, der sich wie der Staudruck der lawinenzugewandten Seite errechnet ($c_d = 1$). Seitenwände und Dächer können, aufgrund großer Turbulenzen, auch kurzzeitig auf Druck beansprucht werden. Der dynamische Unterdruck errechnet sich nach Rudolf-Miklau und Sauermoser (2011) wie folgt:

$$p_{sog} = -\frac{1}{2}\,\rho_{staub}\,v_{staub}^2 \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.11}$$

mit

$\rho_{staub}$ Dichte der Staublawine in [kg/m$^3$]
$v_{staub}$ Fließgeschwindigkeit der Staublawine in [m/s].

- Die Staublawine übt auf alle über- bzw. umströmten Flächen einen hydrostatischen Druck (ungefähr zwischen 0.5 kN/m$^2$ und 2.0 kN/m$^2$) aus.
- In der Sturzbahn oder einem frühen Stadium des Auslaufes sind auf flache Hindernisse Scherspannungen im Bereich von 0.5 bis 5.0 kN/m$^2$ zu erwarten (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).
- Nach Issler (1999) können in Abhängigkeit von der Hangneigung für das Höhen-, Längen- und Breitenwachstum einer Staublawine Anhaltswerte näherungsweise abgeschätzt werden (siehe Tabelle 4.6). Darin stellt $x$ die Distanz, welche die Lawinenfront zurücklegt, dar.

Tabelle 4.6: Höhen-, Längen- u. Breitenwachstum von Staublawinen (aus: Issler, 1999).

| Hangneigung | Höhenwachstum | Längenwachstum | Breitenwachstum |
|---|---|---|---|
| | $dh/dx$ | $dl/dx$ | $db/dx$ |
| 10 ° | 0.05 | | |
| 30 ° | 0.10 | 0.4 | 0.5 |
| 50 ° | 0.15 | | |

Nach Issler (1999) sind die in der SIA 261 - Einwirkung auf Tragwerke (alt: SIA 160) angegebenen Berechnungs- und Dimensionierungsverfahren grundsätzlich auch für Bauten im Einflussbereich von Staublawinen zu verwenden. Die dort angegebenen Windstaudrücke sind jedoch durch den Staublawinendruck bei der zugrunde gelegten Wiederkehrdauer zu

ersetzen, falls Letztere höher ist. Issler (1999) empfiehlt, abhängig von der Geschwindigkeit der Strömung, der Partikelgröße und der Partikelkonzentration einen realistischen Staudruckkoeffizienten $f$ zwischen 0.5 und 1.0 zu wählen. Bei Unsicherheiten bzw. bei Anströmungsrichtung normal zum Hindernis ist $f$ mit 1.0 anzusetzen.

Da keine exakten Methoden zur Bestimmung der Geschwindigkeit von Staublawinen existieren sind in der ONR 24805 (2010) Geschwindigkeitswerte von 30 m/s bis 70 m/s angegeben. Für die Dichte des Staubanteils sind Werte von 5 kg/m$^3$ bis 10 kg/m$^3$ und für die Saltationsschicht 10 kg/m$^3$ bis 50 kg/m$^3$ anzunehmen. Die Höhe der Saltationsschicht beträgt 1 m bis 5 m und die Höhe der Staubschicht kann bis über 100 m betragen (siehe dazu auch Abbildung 2.2).

Große Lawinen bestehen meist aus einem Staubanteil, Fließanteil und einer zwischen den beiden Hauptschichten liegenden Übergangsschicht oder Saltationsschicht (Mischlawine). Zusätzlich dazu ist zu beachten, dass die Saltationsschicht und die Staubschicht zwar eine bedeutend geringere Dichte aufweisen, aber auf der anderen Seite eine höhere Geschwindigkeit besitzen und dem Fließanteil vorauseilen (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011). Die Verteilung der Drücke bei einer Mischlawine auf ein Hindernis ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

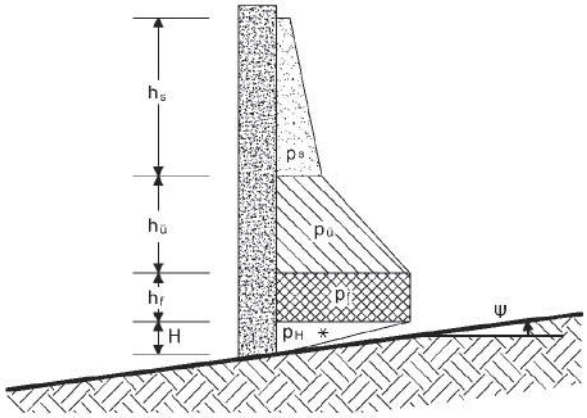



Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Druckes einer Mischlawine auf ein umströmtes Hindernis (aus: ONR 24805, 2010).

## 4.3 Nassschneelawinendruck

Da das Fließverhalten von Nassschneelawinen noch weitgehend unerforscht ist, wird die Druckberechnung auf ein Hindernis näherungsweise nach den Gleichungen in Abschnitt 4.1 berechnet. Anders als Staublawinen weisen Nassschneelawinen eine geringe Fließgeschwindigkeit, aber eine hohe Dichte auf. Es wird empfohlen den Nassschneelawinendruck mit einer Dichte von $\rho = 400\,\mathrm{kg/m^3}$ zu berechnen (Rudolf-Miklau und Sauermoser, 2011).

## 4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der dynamische Druck $p$ einer Lawine abhängig von der Dichte $\rho$ und der Geschwindigkeit $v$ bestimmt wird. Die Abschätzung eines dynamischen Druckes $p$ einer Fließlawine, Staublawine und Nassschneelawine geht immer auf die Gleichung

$$p = \rho\, v^2 \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{4.12}$$

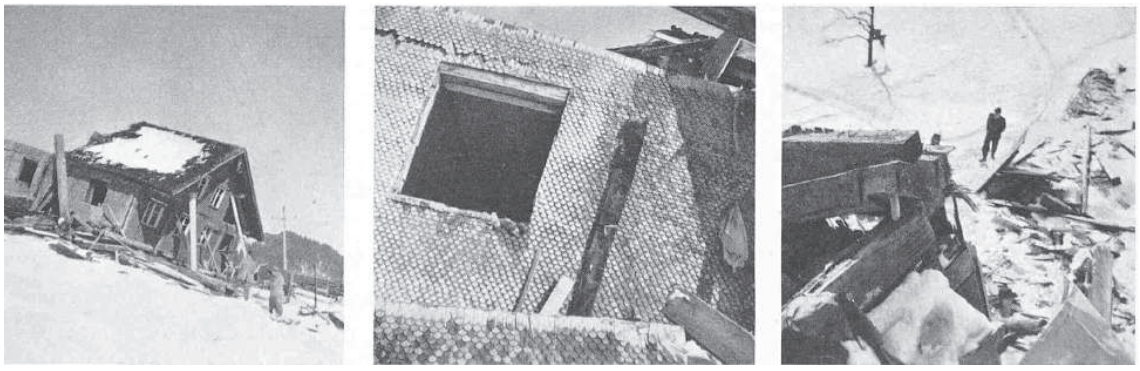
zurück. Es werden lediglich unterschiedliche Dichten $\rho$ und Geschwindigkeiten $v$ zur Berechnung verwendet (vgl. Tabelle 2.2). Die Dichte $\rho$ ist meist nicht konstant über die Höhe der Lawine, ist oft schwierig einzelnen Schichten zuzuordnen und verändert sich mit der Zeit. Dasselbe gilt für die Geschwindigkeit $v$. Aus diesem Grund ist die Berechnung des dynamischen Druckes der Lawine über die Gleichung 4.12 nur eine grobe Abschätzung.

KAPITEL 5

# Rückrechnungen auf den Zerstörungsdruck

Das Kapitel 5 gibt einen Überblick über Rückrechnungen des Zerstörungsdrucks aus verschiedenen Objektschäden. Der schweizer Bauingenieur Adolf Voellmy veröffentlichte in der Schweizer Bauzeitung den Artikel „Über die Zerstörungskraft von Lawinen“ (Voellmy, 1955). In diesem Artikel berechnete er Zerstörungsdrücke aus Schäden der Lawinenkatastrophe aus dem Jahre 1954 in Vorarlberg. In Abbildung 5.1 sind ausgewählte Schäden dieser Lawinenkatastrophe dargestellt. Auch der österreichische Statiker Helmuth Tschom befasste sich mit Rückrechnungen von Lawinenschäden. Dieser beschäftigte sich mit den größeren Lawinenkatastrophen in Tirol. Dazu gehören die Madleinlawine 1984 in Ischgl, die Gidis - Portrinnerlawine 1984 in Galtür, die Moosbachlawine 1984 in Kappl, die Schiltilawine 1984 in Fiss, die Verwalllawine 1986 in Obergurgl, die Wolfsgrubenlawine 1988 in St.Anton und die Wasserleiterlawine 1999 in Galtür. Bei den genannten Lawinen wurden Schäden erhoben und diese Erhebungen verwendete Helmuth Tschom um den Zerstörungsdruck der Lawine rückzurechnen.

(a)



(b)

Abbildung 5.1: Schäden der Lawinenkatastrophe in Vorarlberg, 1954: (a) Mesmerhaus in Blons; (b) Haus in Sonntag (aus: Voellmy, 1955).

## 5.1 Rückrechnungen nach Voellmy

Die aufgrund eines Lawinenniedergangs zerstörten Häuser in Blons und Sonntag (siehe Abbildung 5.1) waren Objekte, die Voellmy (1955) genauer untersuchte und mithilfe sehr einfacher Berechnungen den Zerstörungsdruck aus den Schäden rückrechnete. Beide Häuser waren in Blockbauweise erstellt worden. Die Hauptdaten zu den Häuseren sind in der Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Hauptdaten des Hauses Blons und Sonntag (aus: Tschom, 2000).

| | | Haus Blons | Haus Sonntag |
|---|---|---|---|
| Breite rd. | m | 6 | 10 |
| Länge rd. | m | 8 | 10 |
| Höhe 1.Etage rd. | m | 2.5 | 2.5 |
| Höhe Giebelwand rd. | m | 4 | 4 |
| Wanddicke (ohne Schindeln) | cm | 17 - 18 | 16 |
| Dachfläche rd. | $m^2$ | 100 | 180 |
| Gewicht (gesch.) rd. | t | 40 - 50 | 60 - 70 |
| Kraft F zum einseitigen Heben | | | |
| einschl. Schneelast rd. | t | 20 - 25 | 30 - 35 |
| Auftrieb pro 1 $m^2$ Wand rd. | $kg/m^2$ | 650 - 750 | 700 - 800 |

Eine mögliche Vorgehensweise von Voellmy (1955) zur Berechnung des Zerstörungsdruckes aus einem Schaden wird exemplarisch am nachfolgenden Beispiel der hinteren Gebäudewand des Mesmerhauses in Blons gezeigt. Die Breite $b$ der Wand betrug ungefähr 6 m und die Dicke $d$ der Balken 17 cm bis 18 cm (siehe Tabelle 5.1). Mit der Dicke der beiden Holzbalken und der Gleichung für das Widerstandsmoment $W$ eines Rechteckquerschnitts

$$W = \frac{d\,d^2}{6} \qquad [\mathrm{m}^3] \tag{5.1}$$

erhält man das Widerstandsmoment $W_1$ und $W_2$ zu:

$$W_1 = \frac{0.17 \cdot 0.17^2}{6} = 8.19 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^3 \tag{5.2}$$

$$W_2 = \frac{0.18 \cdot 0.18^2}{6} = 9.72 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}^3. \tag{5.3}$$

Das statische System der Holzbalken der angeströmten Gebäudewand wird vereinfacht als Einfeldträger gewählt. Das maximale Feldmoment $M_{max}$ eines Einfeldträgers berechnet sich aus:

$$M_{max} = \frac{q\,l^2}{8} \qquad [\mathrm{kNm}] \tag{5.4}$$

mit

$q$ Belastung auf den Einfeldträger in $[\mathrm{kN/m}^2]$
$l$ Länge des Einfeldträgers [m].

Nach der Annahme von Voellmy (1955) einer geschlossenen Wand, einer Biegefestigkeit des Holzes von $f_{mk} = 400{\cdot}10^4\,\mathrm{kg/m^2}$ und mit den bereits berechneten Widerstandsmomenten $W_1$ und $W_2$ lässt sich mit

$$q = \frac{8\, f_{mk}\, W}{b^2\, d} \qquad [\mathrm{kg/m^2}] \tag{5.5}$$

ein Zerstörungsdruck von

$$q_1 = \frac{8 \cdot 400 \cdot 10^4 \cdot 8.19 \cdot 10^{-4}}{6^2 \cdot 0.17} = 4281.5\,\mathrm{kg/m^2} \tag{5.6}$$

und

$$q_2 = \frac{8 \cdot 400 \cdot 9.72}{6^2 \cdot 0.18} = 4800.0\,\mathrm{kg/m^2} \tag{5.7}$$

berechnen. Bildet man den Mittelwert von $q_1$ und $q_2$ so erhält man den Zerstörungsdruck $q$ zu:

$$q = \frac{4281.5 + 4800.0}{2} = 4540.7\,\mathrm{kg/m^2}. \tag{5.8}$$

Der angegebene Druck $q$ von ungefähr $4500\,\mathrm{kg/m^2}$ wird von Voellmy (1955) als obere Grenze beurteilt, da durch die Öffnungen in der Wand die Festigkeit stark vermindert wird und damit nicht mehr die Biegefestigkeit der Balken maßgebend ist. In diesem Fall sind die Kräfte, welche durch die Verbindungen der Holzbalken untereinander übernommen werden, maßgebend. Nach Voellmy (1955) wird dieser Druck wahrscheinlich höchstens zur Hälfte erreicht.

Aus den Untersuchungen nach Voellmy (1955) ergab sich, dass die Zerstörungen an der angeströmten Giebelwand und an der Dachhaut des Mesmerhauses in Blons auf eine nach oben gerichtete Kraftkomponente zurückzuführen ist. Somit wurde auch noch das Kippen um die Vorderkante dieses Hauses betrachtet. Voellmy (1955) schätzte das Gewicht des Hauses G (mit Mobilar, Schneelast und ohne Fundament) zwischen 40 und 50 t. Wenn man das Momentengleichgewicht

$$\frac{G}{2} = F \cdot 1 \tag{5.9}$$

um die Vorderkante (VK) des Hauses in Blons aufstellt ergibt sich nach Abbildung 5.2 die Kraft F, welche zum Kippen erforderlich ist, schätzungsweise zwischen 20 und 25 t.

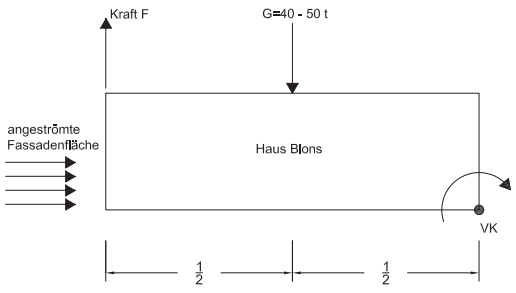



Abbildung 5.2: Skizze zur Abschätzung der vertikal nach oben gerichteten Kraft F.

Voellmy (1955) gibt in der Tabelle 5.1 einen Auftrieb pro $m^2$ Wand von 650 bis 750 $kg/m^2$ an. Mit den Hauptdaten in der Tabelle 5.1 ergibt sich nach Voellmy (1955) der Auftrieb pro $m^2$ der angeströmten Fassadenfläche des Hauses in Blons ungefähr zu:

$$\text{Auftrieb pro m}^2 \text{ Wand} = \frac{20000}{6 \cdot 2.5 + 4 \cdot 3} = 740.74\,\text{kg/m}^2. \tag{5.10}$$

Zusammenfassend interpretiert Voellmy (1955), dass die großen Zerstörungswirkungen auf die nach oben gerichteten Kraftkomponenten auf die Häuser zurückzuführen sind, da bei gewöhnlichen Wohnbauten normalerweise keine konstruktiven Maßnahmen für solche Kraftwirkungen getroffen werden.

Weiters wurden noch Rückrechnungen auf den Zerstörungsdruck aus Objektschäden, wie ein Betonfundament von einer Seilbahnstation, eine Profileisen-Stütze und eine umgeworfene Lokomotive (Bahnhof Dalaas), gemacht. Eine genaue Beschreibung über diese und auch noch weitere untersuchte Schäden bietet Voellmy (1955). Die beobachteten Zerstörungswirkungen fasst Voellmy (1955) wie folgt zusammen:

- Die Kräfte, welche die untersuchten Zerstörungen im Lawinenzug verursachen, entstehen aus der Stauwirkung, welche das Objekt der strömenden Schneemasse (Lawine) entgegensetzt. Bei den untersuchten Fällen erfolgte das Ansteigen der Kräfte auf ihr Maximum verhältnismäßig langsam. Die Wirkung der Lawine auf Objekte muss deshalb nicht nach der Theorie des Stoßes berechnet werden, sondern man kann nach statischen Prinzipien auf die wirkenden Kräfte schließen.

- An wenig geneigten Hängen wirkt die Stoßkraft, die aus der Lawine resultiert, nach oben. Bei sehr steilen Hängen kann diese auch von oben nach unten wirken. Die infolge des Staudruckes einer Lawine auftretenden Vertikalkräfte können bei normaler Ausführung der Häuser etwa die Hälfte der Horizontalkraft erreichen.

- Decken werden durch das Überströmen einer Lawine entsprechend der bei den jeweiligen Verhältnissen auftretenden Lawinenhöhe bzw. Stauhöhe durch das Schneegewicht beansprucht.

- Trümmer, Steine, Bäume und Ähnliches können Rammeffekte verursachen, die gegebenenfalls bei einer Neuanlage durch spezielle Konstruktionen oder Materialien berücksichtigt werden können.

- Die Zerstörungswirkung des Luftstoßes, welcher der Lawine vorauseilt, war bei den untersuchten Fällen gering und reichte nur zum Eindrücken von Fenstern und leichten Türen. Für diese Schäden genügt ein Druckstoß von 500 $kg/m^2$. Wirbelschichten einer Staublawinenfront können sich ähnlich wie Druck- und Sogwirkungen eines Verdichtungsstoßes der Luft auswirken. Zerstörungen, welche auf eine typische Sogwirkung zurückzuführen wären, konnten keine nachgewiesen werden.

## 5.2 Rückrechnungen nach Tschom

In diesem Abschnitt wird ein Beispiel einer Rückrechnung auf den Zerstörungsdruck aus dem Gebäudeschaden am Haus Zangerl Paula in Galtür vorgestellt. In den folgenden Abschnitten wird der Schadenshergang, die Berechnung der Kräfte in den für Tschom (2000) maßgebenden Bauteilen und die Berechnung des Zerstörungsdruckes beschrieben.

Alle in diesem Abschnitt angeführten Vorgehensweisen, Erläuterungen und Annahmen stammen aus Tschom (2000) und aus einem persönlichen Interview [1].

### 5.2.1 Allgemeine Beschreibung des Schadensherganges

Das Haus Zangerl Paula (siehe Abbildungen 5.3 bis 5.5) ist Teil eines Doppelhauses und im Zuge des Lawinenereignisses 1999 in Galtür von der Wasserleiterlawine schwer beschädigt worden. Das Haus Zangerl Paula wurde von der Lawine am Eck getroffen (siehe Lageplan in Abbildung 5.3) und das komplette Obergeschoss wurde zerstört (Abbildung 5.4). Tschom (2000) ging davon aus, dass die Wandscheiben Sx1, Sx2 und Sx3 (farbig in Abbildung 5.4 und 5.6) maßgebend für die Aufnahme der Lawinendruckkraft sind. Die Berechnung der Kräfte in diesen Wandscheiben erfolgt im Abschnitt 5.2.2.

Abbildung 5.3: Lageplan (nicht maßstäblich): Bereich Haus Zangerl Paula (aus: Tschom, 2000).

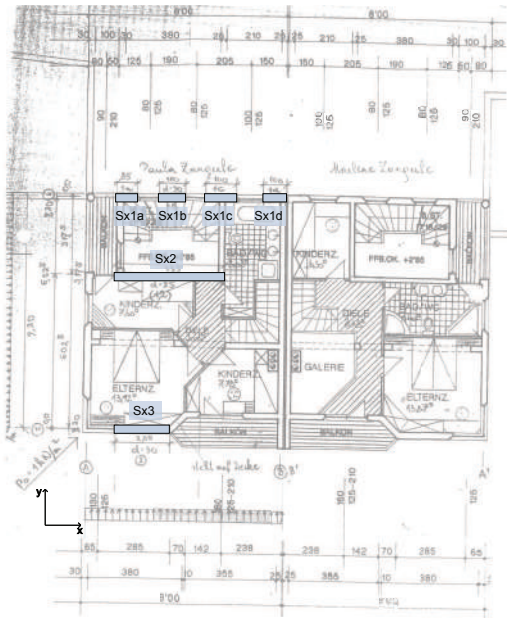



Abbildung 5.4: Obergeschoss (nicht maßstäblich): Haus Zangerl Paula und Zangerl Marlene mit den eingetragenen maßgebenden Wandscheiben für die Aufnahme des Lawinendruckes (aus: Tschom (2000), bearbeitet).

[1] Persönliches Interview mit Helmuth Tschom, geführt in Innsbruck am 20.05.2015.

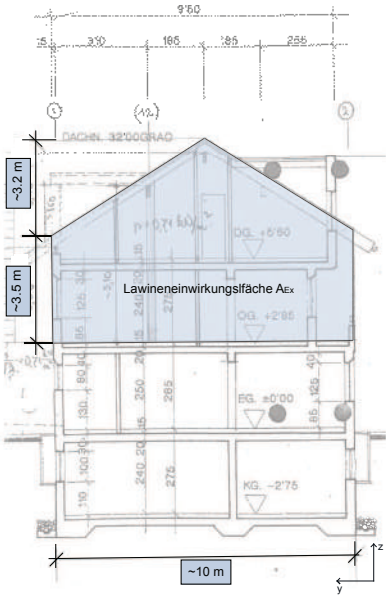



Abbildung 5.5: Schnitt (nicht maßstäblich): Haus Zangerl Paula mit farblich hinterlegter Lawineneinwirkungsfläche $A_{Ex}$ (aus: Tschom (2000),bearbeitet).

### 5.2.2 Berechnung der Kräfte in den Scheiben Sx1, Sx2 und Sx3

Zuerst war es wichtig Unterlagen, wie den Lageplan (Abbildung 5.3), Grundriss (Abbildung 5.4) und Schnitt (Abbildung 5.5) des Gebäudes, zu beschaffen. Anhand der aufgenommenen Schäden und einer Zeugenbefragung konnte die Richtung der Lawine mit 37 ° gegen Nord angenommen werden. Dies entspricht einem Anprallwinkel $\alpha$ auf das Haus Zangerl Paula von 45 °. Unter Zuhilfenahme des Schnittes (Abbildung 5.5) wird die Lawineneinwirkungsfläche $A_{Ex}$ (farbig in Abbildung 5.5) zu

$$A_{Ex} = 3.5 \cdot 10 + 3.2 \cdot \frac{10}{2} = 51.0\,\mathrm{m}^2 \tag{5.11}$$

abgeschätzt. Zum besseren Verständnis der folgenden Berechnung der unbekannten Scheibenkräfte $X_1$, $X_2$ und $X_3$, ist in Abbildung 5.6 eine Prinzipskizze des Berechnungsvorganges dargestellt. Darin geht Tschom (2000) davon aus, dass die Wandscheibe Sx1 durch die Fenster geschwächt wird. Deshalb wird die Wandscheibe Sx1 nicht in ihrer vollen Länge angesetzt. Es wird ein Lawinendruck, eine sogenannte statische Ersatzlast, $p_0$ von 1 kN/m$^2$ unter $\alpha = 45°$ auf das Haus Zangerl Paula angesetzt. Damit ergibt sich eine resultierende Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ auf das Obergeschoss von:

$$H_x = A_{Ex}\, p_0\, \cos(\alpha) = 51.0 \cdot 1 \cdot \cos(45) = 36.06\,\mathrm{kN}. \tag{5.12}$$

Mit $\alpha = 45°$ ergibt sich in y - Richtung natürlich auch eine Lawinendruckkraft $H_y$. Diese ist nach Tschom (2000) für ein Verschieben des gesamten Hauses Zangerl Paula in y - Richtung verantwortlich. Nach Tschom (2000) führen die Versagensfälle

- Verschieben des gesamten Hauses in y - Richtung und
- Schubversagen der Mauerscheibe Sx2

zum selben Zerstörungsdruck. In dieser Arbeit wird unter Abschnitt 5.2.3 das Schubversagen der Mauerscheibe Sx2 diskutiert. Für eine nähere Betrachtung des Verschiebens des gesamten Hauses in y - Richtung sei auf Tschom (2000) verwiesen.

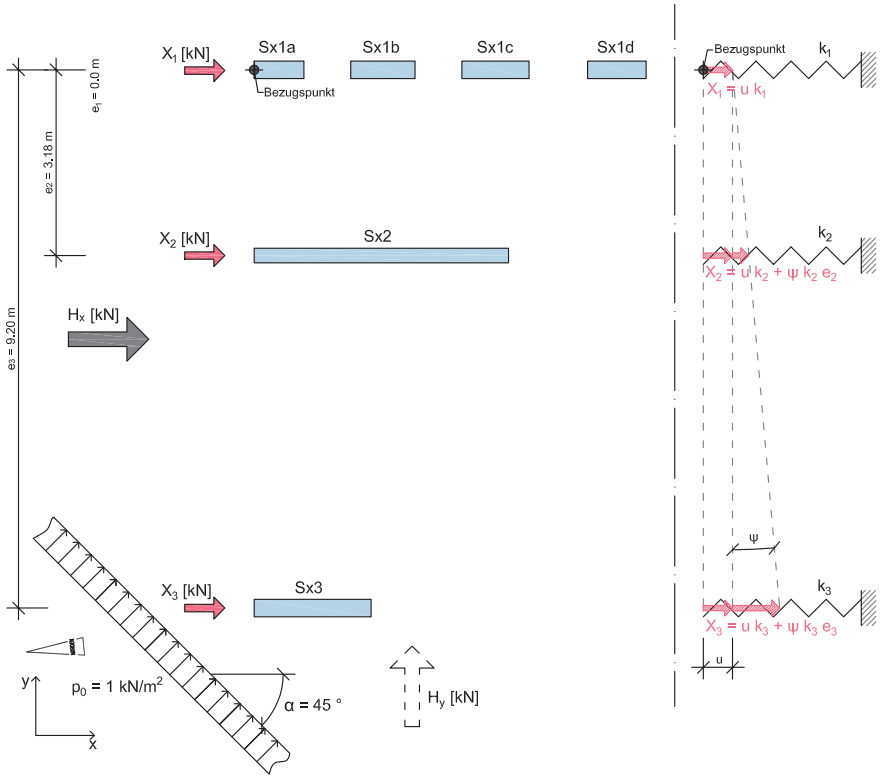



Abbildung 5.6: Prinzipskizze (nicht maßstäblich): maßgebende Wände (hellblau) zur Aufnahme der Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ (grau) zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$, unbekannte Scheibenkräfte (pink) $X_1$, $X_2$ und $X_3$ mit dargestellten Kraftanteilen aus Verschiebung $u$ und Verdrehung $\psi$ und äquivalente Wandsteifigkeiten $k_1$, $k_2$ und $k_3$ (nach: Tschom, 2000).

Um die unbekannten Scheibenkräfte zu bestimmen werden weiters die äquivalenten Wandsteifigkeiten $k_i$ (siehe dazu auch Abbildung 5.6) über $k_i = t_i\, l_i^3/12$ abgeschätzt und in der Tabelle 5.2 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Abmessungen der Wandscheiben und Abschätzung der äquivalenten Wandsteifigkeiten (nach: Tschom, 2000).

| Scheibe | Breite $t_i$ | Länge $l_i$ | $k_i$ |
|---|---|---|---|
| - | [m] | [m] | [m$^4$] |
| 1a | 0.30 | 0.85 | $1.54 \cdot 10^{-2}$ |
| 1b | 0.30 | 1.10 | $3.33 \cdot 10^{-2}$ |
| 1c | 0.30 | 1.00 | $2.5 \cdot 10^{-2}$ |
| 1d | 0.30 | 1.00 | $2.5 \cdot 10^{-2}$ |
| 2 | 0.25 | 4.35 | 1.71 |
| 3 | 0.30 | 2.00 | 0.20 |

Mit der Annahme einer starren Deckenplatte kann diese eine Verdrehung $\psi$ und eine Verschiebung $u$ erhalten (Definition siehe Abbildung 5.6). Durch Aufsummieren der dadurch entstehenden Kräfte in den Wandscheiben ergeben sich die Scheibenkräfte $X_i$ zu:

$$X_i = k_i \, (u + e_i \, \psi) \qquad [\mathrm{kN}]. \tag{5.13}$$

Die Hebelsarme $e_i$ werden in der Prinzipskizze in Abbildung 5.6 definiert. Um die unbekannte Verschiebung $u$ und unbekannte Verdrehung $\psi$ zu berechnen müssen Gleichgewichtsbeziehungen definiert werden. Bildet man die Summe aller Kräfte in x - Richtung

$$X_1 + X_2 + X_3 = H_x \tag{5.14}$$

$$\sum k_i \, u + (k_1 \, e_1 + k_2 \, e_2 + k_3 \, e_3) \, \psi = H_x \tag{5.15}$$

und die Summe der Momente um den in Abbildung 5.6 eingezeichneten Bezugspunkt

$$X_1 \, e_1 + X_2 \, e_2 + X_3 \, e_3 = H_x \, \frac{e_3}{2} \tag{5.16}$$

$$(k_2 \, e_2 + k_3 \, e_3) \, u + (k_2 \, e_2^2 + k_3 \, e_3^2) \, \psi = H_x \, \frac{e_3}{2} \tag{5.17}$$

so können die beiden Unbekannten $u$ und $\psi$ mit den beiden Gleichungen 5.15 und 5.17 bestimmt werden. Wenn man diese in die Gleichung 5.13 einsetzt erhält man die Scheibenkräfte $X_i$ zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$ von $1\,\mathrm{kN/m^2}$, welche in der Tabelle 5.3 angeführt sind.

Tabelle 5.3: Scheibenkräfte zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$ von $1\,\mathrm{kN/m^2}$ (nach: Tschom, 2000).

| | Scheibenkräfte [kN] |
|---|---|
| $X_1$ | 0.16 |
| $X_2$ | 27.29 |
| $X_3$ | 8.61 |

### 5.2.3 Berechnung des Zerstörungsdruckes

In diesem Abschnitt werden die von Tschom (2000) untersuchten Versagensmechanismen (Biegeversagen, Schubversagen und das Versagen auf Reibung), zur Ermittlung eines Zerstörungsdruckes, an der Mauerscheibe Sx2 vorgestellt. Da die Mauerscheibe Sx2 von der Lawine zerstört worden ist, handelt es sich hier um einen Zerstörungsdruck, welcher vom Lawinendruck erreicht worden ist.

#### Biegeversagen der Mauerscheibe Sx2

Zuerst wird das Biegeversagen der Mauerscheibe Sx2 an einem vereinfachten statischen Modell, welches in Abbildung 5.7 dargestellt ist, untersucht.

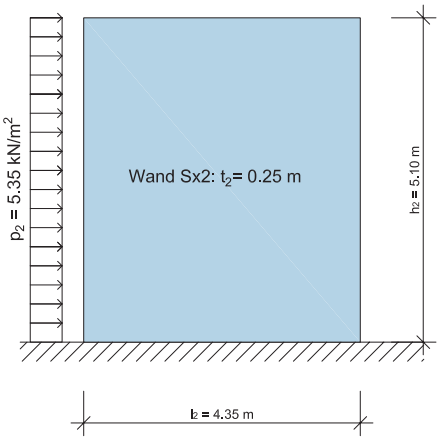



Abbildung 5.7: Statisches Modell eines Kragträgers (nicht maßstäblich) für das Versagen der Mauerscheibe Sx2 auf Biegung (nach: Tschom, 2000).

Mit der Aufteilung der Scheibenkraft $X_2$ über die Mauerhöhe $h_2 = 5.1\,\mathrm{m}$ auf einen gleichförmig verteilten Druck

$$p_2 = \frac{X_2}{h_2} = \frac{27.29}{5.10} = 5.35\,\mathrm{kN/m^2} \tag{5.18}$$

und mit der Idealisierung der Mauer als Kragträger lässt sich das maximale Biegemoment an der Einspannstelle zu

$$M_{max} = p_2\,\frac{h_2^2}{2} = 5.35\,\frac{5.10^2}{2} = 69.59\,\mathrm{kNm} \tag{5.19}$$

berechnen. Mit der Mindestbiegezugfestigkeit $f_{tb}$ eines Kalk - Zement - Mörtel II K von $500\,\mathrm{kN/m^2}$ nach Tschom (2000) und dem Widerstandsmoment eines Rechtecksquerschnitt von

$$W = \frac{t_2\,l_2^2}{6} = \frac{0.25 \cdot 4.35^2}{6} = 0.79\,\mathrm{m^3} \tag{5.20}$$

kann der Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula zufolge Biegeversagen zu

$$p_{zuf.\,Biegung} = \frac{f_{tb}\,W}{M_{max}\,\cos\alpha}\,p_0 = \frac{500 \cdot 0.79}{69.59 \cdot \cos 45}\,1.0 = 8.01\,\mathrm{kN/m^2} \tag{5.21}$$

berechnet werden.

### Schubversagen der Mauerscheibe Sx2

Weiters wird das Schubversagen der Mauerscheibe Sx2 untersucht. Dazu wird die Druckspannung rechtwinklig zur Schubkraft in der betrachteten Querschnittsebene $\sigma_v$ der Mauerscheibe Sx2 mit den in der Tabelle 5.4 angegebenen Belastungsannahmen und den aus Schnitt (Abbildung 5.5) und Grundriss (Abbildung 5.4) bestimmten Einflussflächen zu

$$\sigma_v = \frac{\frac{6.02+3.18}{2} \cdot (q_{dach} + q_{decke}) + 6.70 \cdot q_{mauer}}{t_2} = 323.09\,\mathrm{kN/m^2} \tag{5.22}$$

berechnet.

Tabelle 5.4: Belastungsannahmen für das Eigengewicht des Hauses Zangerl Paula $g$, Nutzlast $p$ und Schneelast $s$ (nach: Tschom, 2000).

| | Eigengewicht g [kN/m$^2$] | Nutzlast p bzw. Schneelast s [kN/m$^2$] | q = g + (p bzw. s) [kN/m$^2$] |
|---|---|---|---|
| Dach | $g_{dach} = 1.50$ | $s_{dach} = 4.50$ | $q_{dach} = 6.00$ |
| Decke über OG | $g_{decke} = 6.50$ | $p_{decke} = 0.50$ | $q_{decke} = 7.00$ |
| Mauerwerk | $g_{mauer} = 3.14$ | | $q_{mauer} = 3.14$ |

Die wirksame Schubfläche $A_{Schub}$ wird zu

$$A_{Schub} = t_2\, l_2 = 0.25 \cdot 4.35 = 1.09\,\mathrm{m}^2 \tag{5.23}$$

berechnet. Die Schubfestigkeit $\tau_{Bruch}$ für einen Kalk - Zement - Mörtel errechnet sich nach Tschom (2000) wie folgt:

$$\tau_{Bruch} = (50 + 0.2\,\sigma_v)\,3 = (50 + 0.2 \cdot 323.09) \cdot 3 = 343.86\,\mathrm{kN/m}^2. \tag{5.24}$$

Der in Gleichung 5.24 angeführte Faktor 3 ist ein Sicherheitsfaktor den Tschom (2000) selbst gewählt hat. Somit kann der Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula zufolge Schubversagens zu

$$p_{zuf.\,Schub} = \frac{\tau_{Bruch}\, A_{Schub}}{X_2\, \cos\alpha}\, p_0 = \frac{343.86 \cdot 1.09}{27.29 \cdot \cos 45} \cdot 1.0 = 19.38\,\mathrm{kN/m}^2 \tag{5.25}$$

berechnet werden.

**Reibungsversagen der Mauerscheibe Sx2**

Zuletzt wird noch das Versagen auf Reibung der Mauerscheibe Sx2 untersucht. Der Reibungsbeiwert $\mu$ für das Verschieben eines Mauerwerkes auf Beton wird mit 0.76 angenommen. Dieser Reibungsbeiwert korreliert auch mit den publizierten Daten aus Krapfenbauer und Sträussler (2004). Der Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula zufolge Reibungsversagen kann zu

$$p_{zuf.\,Reibung} = \frac{\mu\,\sigma_v\, l_2\, t_2}{X_2\, \cos\alpha}\, p_0 = \frac{0.76 \cdot 323.09 \cdot 4.35 \cdot 0.25}{27.29 \cdot \cos 45}\, 1.0 = 13.84\,\mathrm{kN/m}^2 \tag{5.26}$$

berechnet werden.

### 5.2.4 Ergebnis der Berechnungen

Nach Tschom (2000) ist der Zerstörungsdruck von 19.4 kN/m$^2$ jener Druck, welcher zum Schubbruch und damit zum Versagen des „Rückgrates“ des Gebäudes führte (vgl. Gleichung 5.25). Der resultierende, kleinere Zerstörungsdruck von 8.01 kN/m$^2$ aus der Berechnung des Biegeversagens der Wandscheibe Sx2 ist nach Tschom (2000) nicht maßgebend.

### 5.2.5 Diskussion der Rückrechnung

In diesem Abschnitt wird die Rückrechnung des Zerstörungsdruckes des Hauses Zangerl Paula nach Tschom (2000) diskutiert und allfällige Unsicherheiten werden aufgezeigt. Auf

diese Weise soll die Aussagekraft dieser Ergebnisse erläutert werden. Anhand des vorgestellten Beispiels einer Rückrechnung im Abschnitt 5.2.2 und 5.2.3 werden folgende maßgebende Unsicherheiten festgestellt:

- Versagensmechanismus und Lastverteilung auf die Wandscheiben
- Materialkennwerte des Mauerwerks
- Lagerungsbedinungen der Wandscheibe
- Einwirkungsfläche der Lawine
- Anprallwinkel der Lawine
- Lastannahmen (Eigengewicht, Nutzlast usw.)

Diese aufgelisteten Unsicherheiten werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.

### Versagensmechanismus und Lastverteilung auf die Wandscheiben

Nach einer Katastrophenlawine ist es meist schwierig festzustellen, wie das Gebäude versagt hat. Abbildung 5.8 veranschaulicht, dass eine genaue Schadensaufnahme bzw. Schadensbeurteilung nach einem Katastrophenereignis nahezu unmöglich erscheint. In dieser Darstellung sind ein eingestürzter Dachstuhl, ein Deckenversagen, einige zerstörte Wände und eine große Menge Schutt zu erkennen. Wie oder in welcher Reihenfolge diese Bauteile versagt haben kann man im Nachhinein nicht mehr genau feststellen. Die Kenntnis des tatsächlichen Versagensmechanismus ist jedoch für eine plausible Rückrechnung unumgänglich. Tschom (2000) geht davon aus, dass ein Schubversagen der Wandscheibe Sx2 ein Versagen des kompletten Obergeschosses herbeigeführt hat. Im Folgenden wird diese Annahme des Versagensmechanismuses kontrolliert.

Abbildung 5.8: Schadensereignis in Valzur im Paznauntal, 1999 (aus: Margreth, 2015).

Um den angenommenen Versagensmechanismus des Obergeschosses zu überprüfen wird die Wandscheibe Sx2 nicht berücksichtigt und die gesamte Lawinenlast auf die Wandscheiben Sx1 und Sx3 angesetzt (siehe Abbildung 5.9). Daraus folgt, dass die halbe resultierende Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x \,/\, 2 = 18.03\,\mathrm{kN}$ auf die Wandscheibe Sx1 und die andere Hälfte auf die Wandscheibe Sx3 trifft. Anschließend wird das Schubversagen der Wandscheibe Sx3 untersucht. Dazu wird die Schubfläche $A_{Schub}$ der Wandscheibe Sx3 zu

$$A_{Schub} = t_3\, l_3 = 0.30 \cdot 2.00 = 0.60\,\mathrm{m}^2 \tag{5.27}$$

berechnet. Um die Schubfestigkeit zu bestimmen muss, wie in Abschnitt 5.2.3, mit der Tabelle 5.4 und der Breite $t_3$ der Wandscheibe Sx3 von 0.30 m, zuerst die Druckspannung rechtwinklig zur Schubkraft in der betrachteten Querschnittsebene $\sigma_v$ wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_v = \frac{\frac{9.20}{2} \cdot (q_{dach} + q_{decke}) + 6.70 \cdot q_{mauer}}{t_3} = 269.24\,\mathrm{kN/m^2}. \tag{5.28}$$

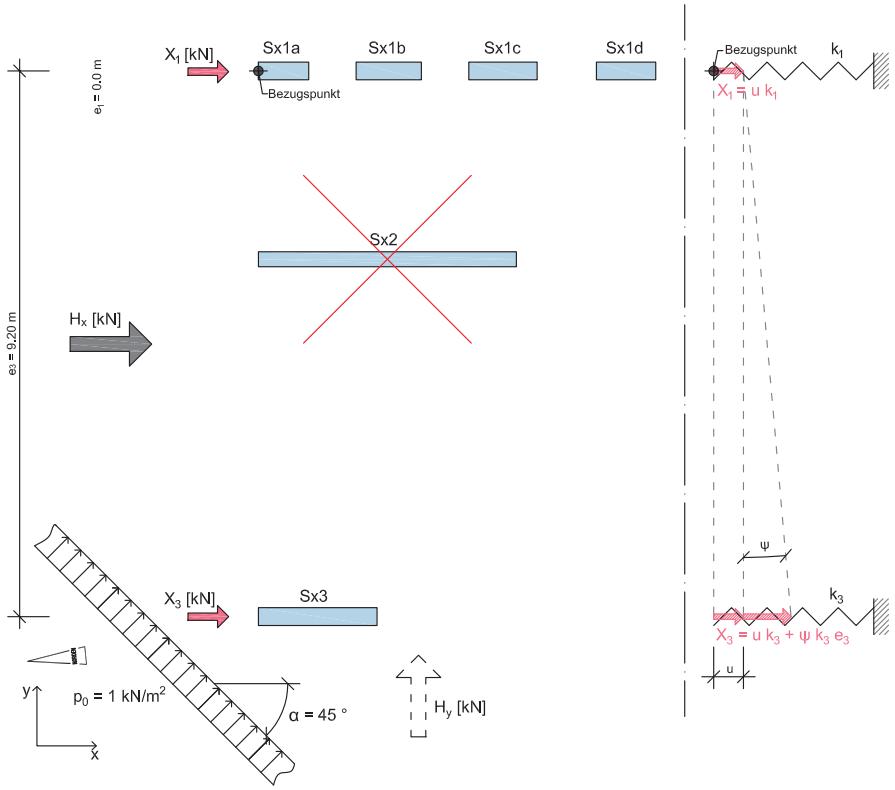



Abbildung 5.9: Prinzipskizze (nicht maßstäblich): maßgebende Wände (hellblau) zur Aufnahme der Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ (grau) zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$, unbekannte Scheibenkräfte (pink) $X_1$ und $X_3$ mit dargestellten Kraftanteilen aus Verschiebung $u$ und Verdrehung $\psi$ und äquivalente Wandsteifigkeiten $k_1$ und $k_3$ (nach: Tschom (2000),bearbeitet).

So kann die Schubfestigkeit $\tau_{Bruch}$ nach Tschom (2000) zu

$$\tau_{Bruch} = (50 + 0.2\,\sigma_v)\,3 = (50 + 0.2 \cdot 269.24) \cdot 3 = 311.55\,\mathrm{kN/m^2} \tag{5.29}$$

ermittelt werden. Mit der Scheibenkraft $X_3$ von 18.03 kN und einem Anprallwinkel $\alpha$ von 45° erhält man den Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula zu:

$$p_{zuf.\,Schub} = \frac{\tau_{Bruch}\,A_{Schub}}{X_3\,\cos\alpha}\,p_0 = \frac{311.55 \cdot 0.60}{18.03 \cdot \cos 45} \cdot 1.0 = 14.66\,\mathrm{kN/m^2}. \tag{5.30}$$

Dieser Zerstörungsdruck zufolge Schubversagen der Wandscheibe Sx3 von 14.66 kN/m$^2$ ist kleiner als der zuvor berechnete Zerstörungsdruck der Wandscheibe Sx2 von 19.38 kN/m$^2$. Das bedeutet, dass die beiden äußeren Wände den Zerstörungsdruck allein nicht aufnehmen können und bei Versagen der Wandscheibe Sx2, auch die Wandscheiben Sx3 und

Sx1 versagen. Für die in Abbildung 5.9 dargestellte Vereinfachung des Obergeschosses des Hauses Zangerl Paula auf drei Wandscheiben ist dies der maßgebende Versagensmechanismus.

Wenn man jedoch das gesamte Gebäude betrachtet, kann man den Versagensmechanismus des Gebäudes und die Lastverteilung auf die Wandscheiben nicht mehr nachvollziehen. Mit diesen beiden Unbekannten kann ein tatsächlich auftretender Zerstörungsdruck nur sehr grob rückgerechnet werden. Der Experte Stefan Margreth (Bauingenieur) bezog zu diesen Unsicherheiten Stellung und bezeichnete die Problematik, aus einem beschädigten Gebäude einen Zerstörungsdruck zu berechnen, als eine sehr komplexe Fragestellung. Grund dafür ist nicht nur die Einschätzung der exakten Lastverteilungen bei einem Gebäude mit horizontaler Einwirkung, sondern auch die unterschiedlichen Baumaterialien, sowie Öffnungen und Verbindungen in einem Gebäude.[2] Deshalb wird für alle weiteren Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes des Hauses Zangerl Paula die Annahme nach Tschom (2000), dass ein Schubversagen der Wandscheibe Sx2 die Zerstörung des gesamten Obergeschosses herbeiführt, vorausgesetzt.

### Materialkennwerte des Mauerwerks und Lagerungsbedinungen der Wandscheibe

Da die Materialkennwerte eines Mauerwerks eine große Unsicherheit in der Rückrechnung des Zerstörungsdruckes des Hauses Zangerl Paula darstellen, werden diese unter Kapitel 7 im Detail behandelt. Ebenso die Lagerungsbedinungen der Wandscheibe Sx2, welche im Kapitel 8 diskutiert werden.

### Einwirkungsfläche der Lawine

Bei Katastrophenlawinen hat man meist keine genauen Angaben zur Höhe und Dichteverteilung der Lawine und kann somit die Einwirkungsfläche der Lawine nur näherungsweise abschätzen. Tschom (2000) ist bei der Berechnung der Einwirkungsfläche auf das Haus Zangerl Paula von einer Zerstörung durch den Staubanteil der Lawine ausgegangen und setzte deshalb die Lawine nur auf das Obergeschoss und das Dachgeschoss an (vgl. Abbildung 5.5).

### Anprallwinkel und Lastannahmen

Weitere kleinere Unsicherheiten treten beispielsweise bei der Annahme des Anprallwinkels der Lawine oder bei der Berechnung des Eigengewichts des Gebäudes auf. Der Anprallwinkel der Lawine kann anhand von Zeugenaussagen und Schäden in der Sturzbahn gut abgeschätzt werden. Bei der Annahme eines leicht abweichenden Anprallwinkels erhält man verhältnismäßig kleine Abweichungen in den Ergebnissen. Dies zeigt auch die Tabelle 5.5 in dem eine Anprallwinkelvariation anhand des vorgeführten Beispiels des Hauses Zangerl Paula durchgeführt wird. Auch das Eigengewicht des Gebäudes kann mit Plänen und den Lastwirkungen, welche in Bautabellen angegeben sind, gut abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 5.4). Das bedeutet, dass der Anprallwinkel $\alpha$ und das Eigengewicht des Gebäudes im Vergleich zu den bisher angeführten Annahmen kleine Einflüsse auf das Ergebnis haben.

[2] Schriftliche Stellungnahme von Stefan Margreth zum Thema Schadwirkung von Lawinen, am 15.06.2015.

Tabelle 5.5: Anprallwinkelvariation anhand des Beispiels Haus Zangerl Paula.

| Anprallwinkel $\alpha$ [ ° ] | $p_{zuf.Schub}$ [kN/m$^2$] |
|---|---|
| 42.5 | 17.82 |
| 45.0 | 19.38 |
| 47.5 | 21.22 |

## 5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Rückrechnungen nach Tschom

Die Lawinenkatastrophen, welche Tschom (1984, 1986, 1988, 2000) untersuchte, sind die Madleinlawine 1984 in Ischgl (siehe Tabelle 5.6), die Gidis - Portrinnerlawine 1984 in Galtür (siehe Tabelle 5.6), die Moosbachlawine 1984 in Kappl (siehe Tabelle 5.6), die Schiltilawine 1984 in Fiss (siehe Tabelle 5.7), die Verwalllawine 1986 in Obergurgl (siehe Tabelle 5.8), die Wolfsgrubenlawine 1988 in St.Anton (siehe Tabelle 5.9) und die Wasserleiterlawine 1999 in Galtür (siehe Tabelle 5.10).

Die in diesem Abschnitt angeführten Tabellen 5.6 bis 5.10 fassen die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse, der Rückrechnung von Zerstörungsdrücken zufolge Lawineneinwirkung, aus Tschom (1984, 1986, 1988, 2000) zusammen. In den Tabellen findet man zunächst eine allgemeine Information zum Lawinenereignis, wie das Datum, die Bezeichnung der Lawine und den Ort des Lawinenereignisses. Des weiteren geben die Tabellen Auskunft über die durch die Lawinenkatastrophe betroffenen Objekte (bzw. Objekte an denen Schäden aufgenommen wurden), welche Bauteile des Objektes beschädigt oder auch nicht beschädigt wurden, der berechnete Zerstörungsdruck und zusätzliche Bemerkungen. Die Abbildungen 5.10 bis 5.22 zeigen Übersichtspläne und Schadensbilder der in den Tabellen 5.6 bis 5.10 vorkommenden Lawinenereignisse.

Grundsätzlich unterliegt den Rückrechnungen, wie in den Abschnitten 5.1 bis 5.2 gezeigt, immer ein ähnliches Prinzip. Zerstörungsdrücke, welche vom Lawinendruck erreicht (Abkürzung: **L.e.**) wurden, werden aus zerstörten oder beschädigten Objekten rückgerechnet. Im Gegensatz dazu werden Zerstörungsdrücke, welche vom Lawinendruck nicht erreicht (Abkürzung: **L.n.e.**) wurden, aus Objekten, die der Lawineneinwirkung standgehalten haben, nachgerechnet. Der Zerstörungsdruck zufolge einer Lawineneinwirkung wurde am häufigsten an Mauern, Decken, Stützen, Balken, Fenstern und Leitungsmasten rückgerechnet. Ansätze und Annahmen zur Berechnung der Lawinenbelastung sind in den jeweiligen Tabellen unter der Spalte „Bemerkungen“ zu finden.

Die genaue Vorgehensweise bei Rückrechnungen von Tschom (2000) zeigt der Abschnitt 5.2 in dem der Zerstörungsdruck aus dem Gebäudeschaden des Hauses Zangerl Paula in Galtür rückgerechnet wird.

Tabelle 5.6: Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Gidis-Portrinnerlawine, Moosbachlawine und Madleinlawine (nach: Tschom, 1984).

| Datum | Lawine | Ort | Objekt | Welche Bauteile des Objektes wurden beschädigt bzw. nicht beschädigt? | Zerstörungsd. **L.e.** [kN/m$^2$] | Zerstörungsd. **L.n.e.** [kN/m$^2$] | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 09/02/1984 | Gidis - Portrinnerlawine | Paznauntal; Gemeinde Galtür | Gasthof Gemsspitz | Horizontaler Riss in der Giebelwand des Altbaues über der obersten Decke | 3.0 | 16.8 | Der errechnete Zerstörungsdruck (L.e.) reicht um einen Riss zu verursachen, wobei der Zerstörungsdruck (L.n.e.) gerade so hoch ist, dass kein Verschieben der Lagerfuge stattfindet. |
| | | | | Querscheiben nicht beschädigt (Prallwand verteilt den Anpralldruck auf die Querscheiben) | - | 18.0 | In den Querscheiben wurde weder die Biegezug-, noch die Schubfestigkeit überschritten. Daraus kann man schließen, dass der angegebene Zerstörungsdruck (L.n.e.) nicht überschritten wird. |
| | | | | unbewehrter Pfeiler (65 x 25 cm) wurde eingedrückt | 22.0 | - | Die Balkonplatte (16 cm stark und ordnungsgemäß oben liegende Bewehrung) wurde von unten belastet und schräg nach oben geworfen. Dies wurde durch eine Trennfuge in der Kragplatte noch erleichert. Zufolge Überdimensionierung der Altbauwände lässt sich kein Zerstörungsdruck (L.n.e.) realistisch errechnen. |
| | | | | Zusammenfassung: Die Ergebnisse aus der Rückrechnungen der Schäden vom Gasthof Gemsspitz lassen den Schluss zu, dass die „statische Lawinenlast“ die Intensität von ca. 17 kN/m$^2$ erreicht hat. Der erhöhte Staudruck von mindestens 22.0 kN/m$^2$ im NW-Teil lässt sich durch den extremen Stauеffekt (Sackwirkung) aufgrund der Grundrissgestaltung des Gebäudes und der Sogwirkung aufgrund des Flügels der Prallwand (Verdichtung der Luftströmung am Flügelende-Vakuum im „geschützten“ Terrassenbereich-Anziehen der Luft- und Schneemassen) erklären. | | | |
| 09/02/1984 | Moosbachlawine (siehe Abb. 5.10) | Paznauntal; Gemeinde Kappl; Ortsteil Holdernach | Alte Volksschule | Holz-Bundwerk bergseitig vorgelagerter Schuppen wurde total zerstört | 8.0 | 13.4 | Der Zerstörungsdruck (L.e.) ergibt sich aus der Rückrechnung des Schubbruchs des Türpfostens. Der Zerstörungsdruck (L.n.e.) ergibt sich aus der Tatsache, dass sich bei höherer Belastung der Holzbaukörper gegenüber dem Kellerteil verschoben hätte. |
| 09/02/1984 | Madleinlawine (siehe Abb. 5.11) | Paznauntal; Gemeinde Ischgl | Wählamtsgebäude | Fenster der Ost- und Westseite teilweise mit Rollokasten eingedrückt; Giebelverschalung der Ostseite in Mitleidenschaft gezogen; Zerstörung der Telefonzellen vor dem Wählamt; keine Schäden an der straßenseitigen angebrachten Wandtafel, dem Kamin und den Wänden (siehe Abb. 5.12) | 1.0 | 7 bis 11.80 | Die erwähnten Schäden wären nicht aufgetreten, wenn der Staudruck nicht den angegebenen Zerstörungsdruck (L.e.) erreicht hätte. Aus dem Standhalten der Baulichkeiten (keine Risse in den Wänden) lässt sich auf einen Zerstörungsdruck (L.n.e.) schließen. Die 25 % Streuung des Zerstörungsdruck (L.n.e.) resultieren aus der Biegezugfestigkeit von Mörtel bzw. Füllbeton der Mantelbetonwand. |
| | | | | Zusammenfassung: Die „statische Lawinenlast“ kann mit 9.20 kN/m$^2$ angegeben werden. Örtliche Spitzen sind naturgemäß möglich. | | | |
| | | | | Folgerung: Da ein Staudruck von 9.20 kN/m$^2$ nicht der Größenordnung einer solchen Lawine entspricht, ist eine energievernichtende Funktion der vorgelagerten Parkgarage daraus abzuleiten. Die Festteile der Lawinenmasse (Gestein und Holz von 1 ha Wald) wurden zum größten Teils über der Trisanna abgelagert. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass nur mehr die oberen Staubteile der Lawine bis zum Wählamtsgebäude vordrangen. Geschwindigkeiten von über 100 km/h sind dabei auf jeden Fall erreicht worden. | | | |

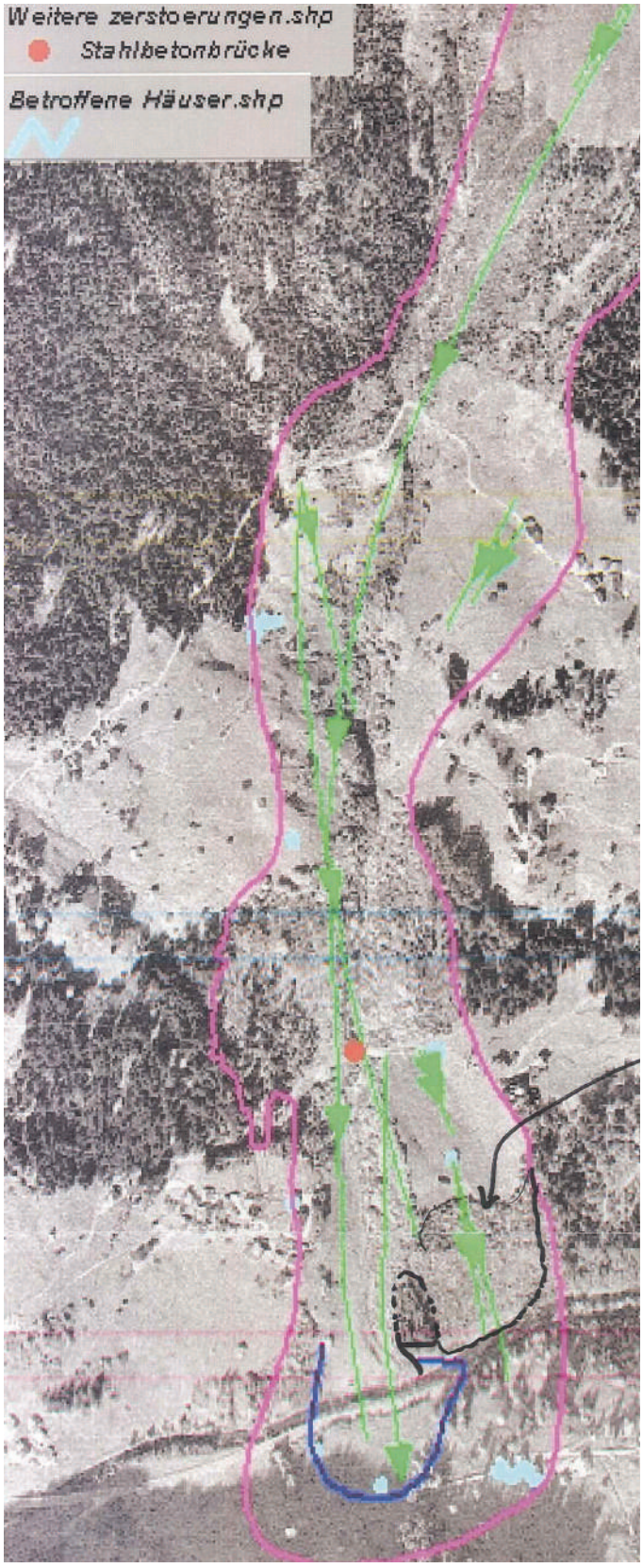



Abbildung 5.10: Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Moosbachlawine (aus: SSL, 2015).

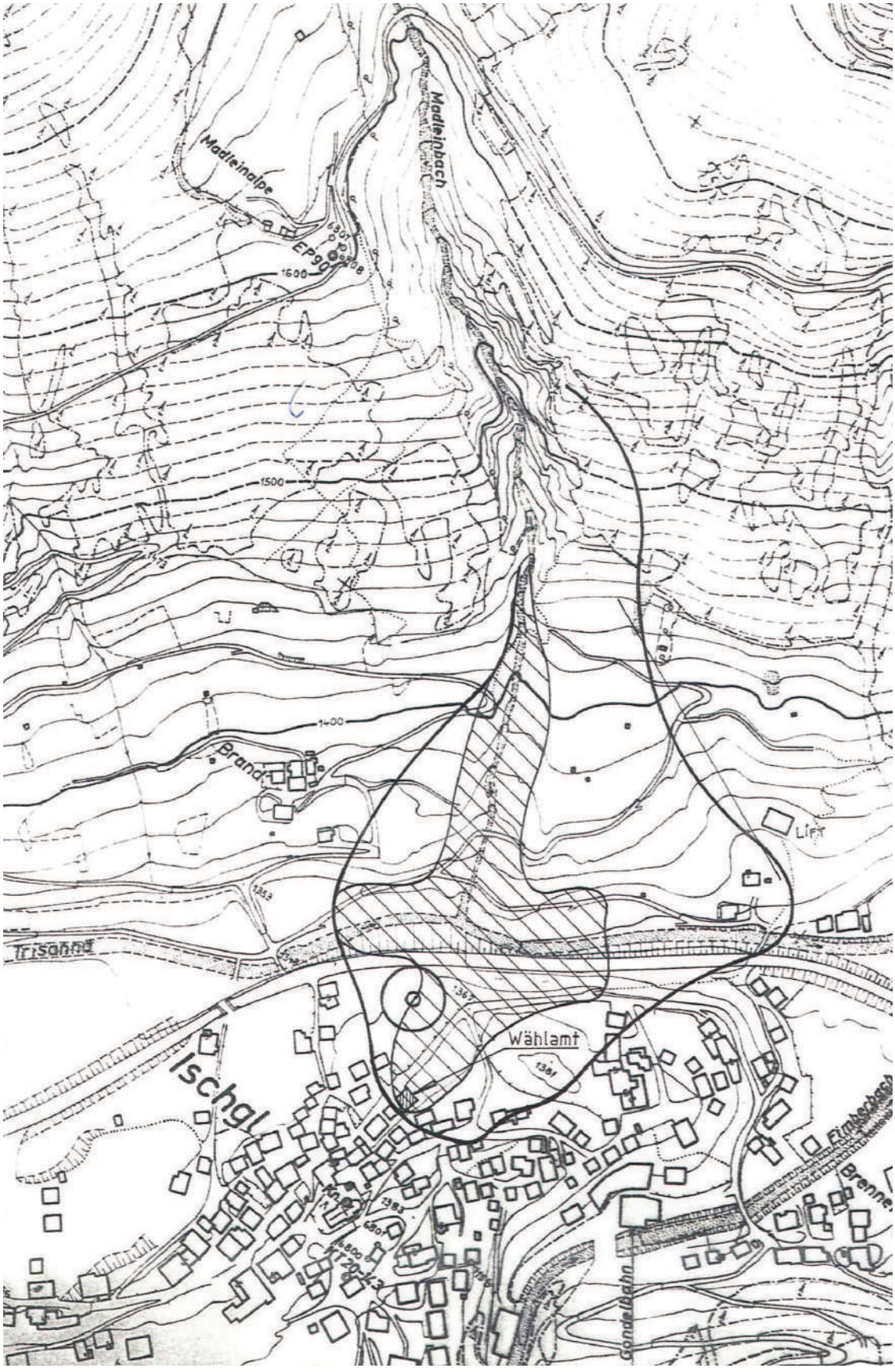



Abbildung 5.11: Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Madleinlawine (aus: SSL, 2015).

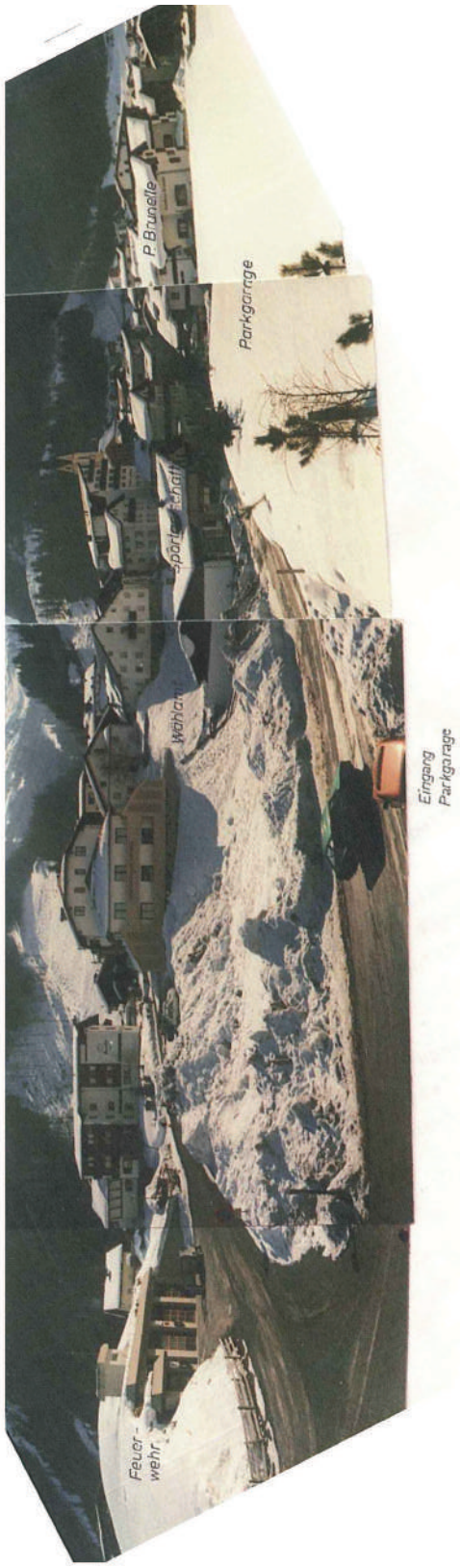



Abbildung 5.12: Ablagerungsgebiet der Madleinlawine im Bereich des Ortsgebietes Ischgl (aus: SSL, 2015).

Tabelle 5.7: Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Schiltilawine (nach: Tschom, 1984).

| Datum | Lawine | Ort | Objekt | Welche Bauteile des Objektes wurden beschädigt bzw. nicht beschädigt? | Zerstörungsd. **L.e.** [kN/m$^2$] | Zerstörungsd. **L.n.e.** [kN/m$^2$] | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08/02/1984 | Schiltilawine | Gemeinde Fiss | Mittelstation auf 1920 m Seehöhe; Talseitiger Bereich | Tankstellenkobel wurde zerstört (23 cm stark, gemauert und mit einer Fertigteildecke abgedeckt) | 2.12 | - | Bei dem angegebenen Mindestdruck tritt eine Kippung des Tankstellenkobels ein. |
| | | | | Stütze 2 intakt | - | 10.04 bis 12.27 | Die Fensterfront zwischen der Achse 2-3 überträgt keinen Staudruck auf die Stütze. Der angeführte Bereich des Zerstörungsdruckes (L.n.e.) berechnet sich aus der Tatsache, dass bei einem größeren Druck die 2 Ankerschrauben M16 von der Fußplatte abgeschert worden wären. |
| | | | | Zusammenfassung: Somit kann die wahrscheinliche „statische Lawinenlast“ mit 7.20 kN/m$^2$ angegeben werden (siehe Abb.5.13). | | | |
| | | | Mittelstation auf 1920 m Seehöhe; Bergseitiger Bereich | Stütze 8 intakt | - | 14.05 bis 17.17 | Die Fensterfront überträgt keinen Staudruck auf die Stütze. Der angeführte Bereich des Zerstörungsdruckes (L.n.e.) berechnet sich aus der Tatsache, dass bei einem größeren Druck die 2 Ankerschrauben M16 von der Fußplatte abgeschert worden wären. |
| | | | | Riegel zur Mittelsäule bei Stütze 8 nicht ausgeknickt | - | 13.24 | Beim angegebenen Zerstörungsdruck (L.n.e.) wäre die Mittelsäule ausgeknickt. |
| | | | | Stütze 9 zerstört | 10.04 bis 12.27 | - | Da die Verblechung zwischen Achse 9-10 den Staudruck überträgt wurde die Stütze 9 zerstört. Es entstand eine größere Belastung als bei Stütze 8, wodurch 2 Ankerschrauben M16 abgeschert wurden. Somit kann in diesem Fall ein Bereich für den Zerstörungsdruck (L.e.) angegeben werden. |
| | | | | Riegel zur Mittelsäule bei Stütze 9 ist ausgeknickt | 10.46 | - | Durch das Ausknicken des Riegels zur Mittelsäule bei Stütze 9 kann ein Zerstörungsdruck (L.e.) berechnet werden. |
| | | | | Zusammenfassung: Somit kann die wahrscheinliche „statische Lawinenlast“ mit 11.60 kN/m$^2$ angegeben werden (siehe Abb.5.13). | | | |
| | | | Mittelstation auf 1920 m Seehöhe; Bergseitiges Stationseck (Eckwirkung) | Stütze 11 versagt | 15.62 bis 19.10 | - | Obwohl die Stütze 11 nur mit halber Einflussbreite belastet war, wurden 2 M16 abgeschert. Somit kann in diesem Fall ein Bereich für den Zerstörungsdruck (L.e.) angegeben werden. |
| | | | | Riegel zur Mittelsäule bei Stütze 11 nicht ausgeknickt | - | 17.87 | Beim angegebenen Zerstörungsdruck (L.n.e.) wäre die Mittelsäule ausgeknickt. |
| | | | | Zusammenfassung: Somit kann die wahrscheinliche „statische Lawinenlast“ mit 16.75 kN/m$^2$ angegeben werden (siehe Abb.5.13). | | | |
| | | | Bemerkungen: Die Streuung des Druckes beim Abscheren der Fußplattenbolzen ergibt sich aus der unteren und oberen Grenze der Scherfestigkeit für die Stahlgüte St 37. Die Knicklastberechnung der Längsriegel ist bei der großen Schlankheit exakt durchführbar (Euler'scher Idealfall). In Abbildung 5.13 ist die wahrscheinliche Staudruckverteilung dargestellt. | | | |

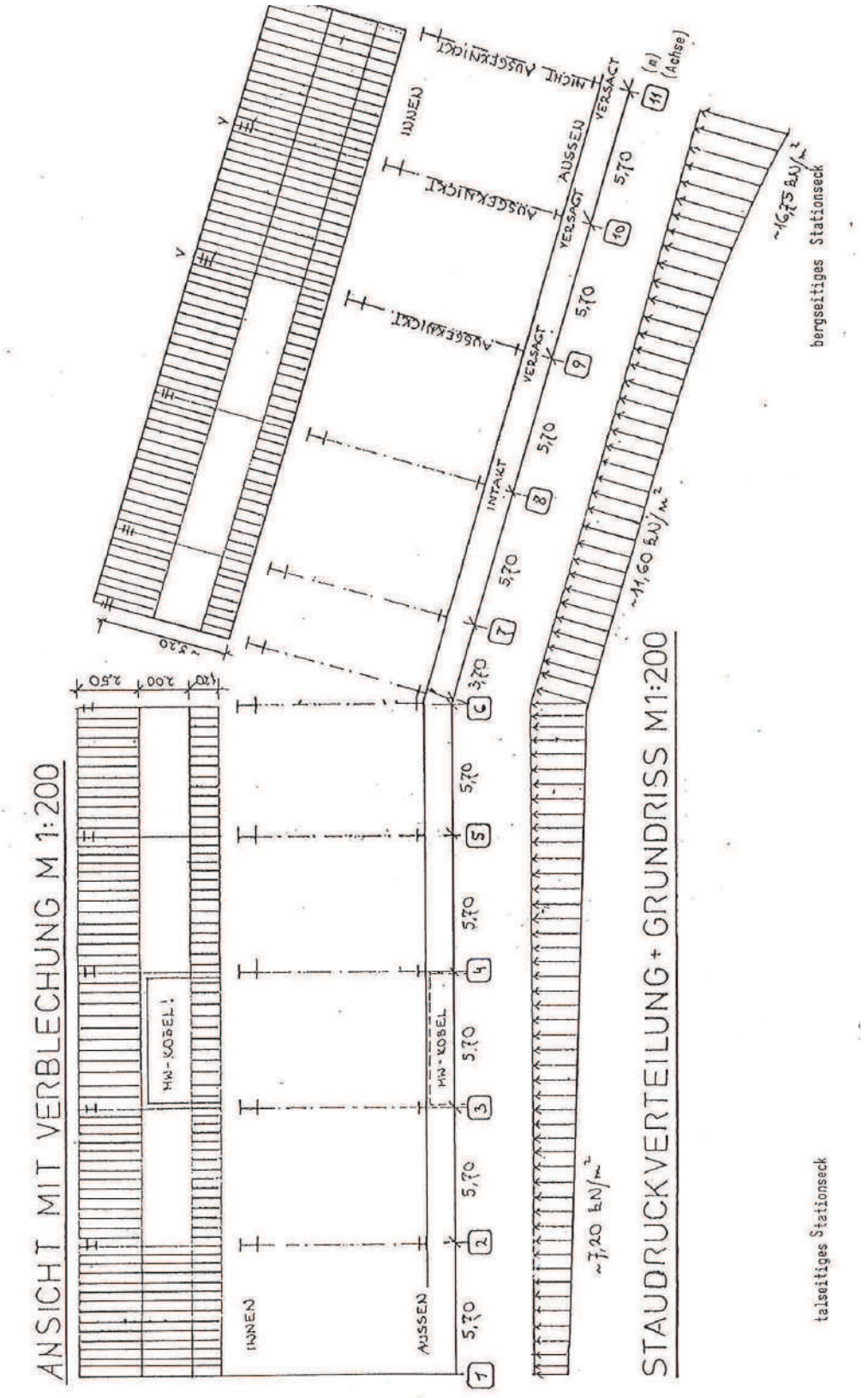
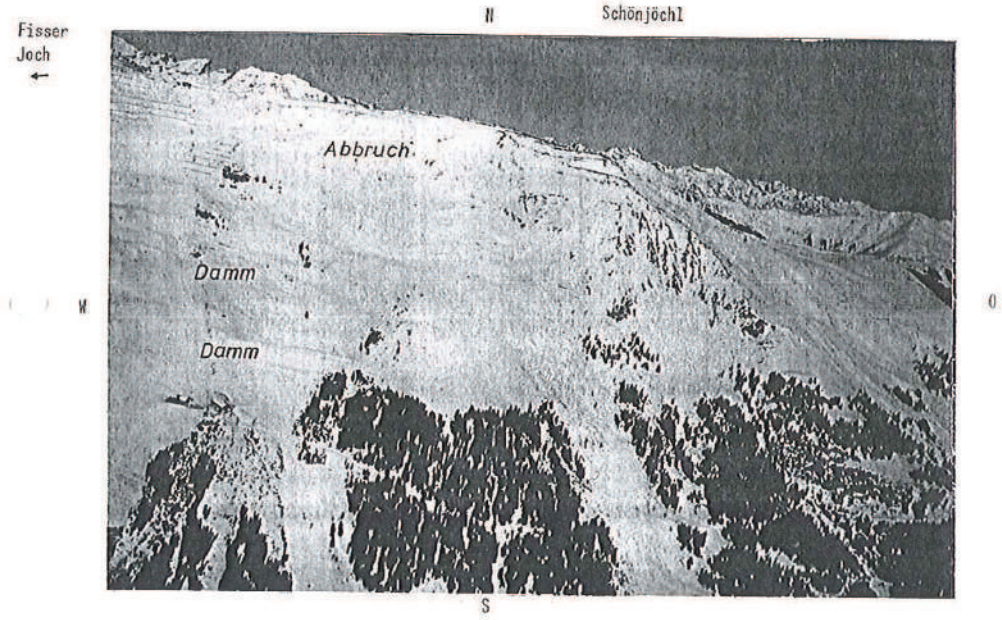


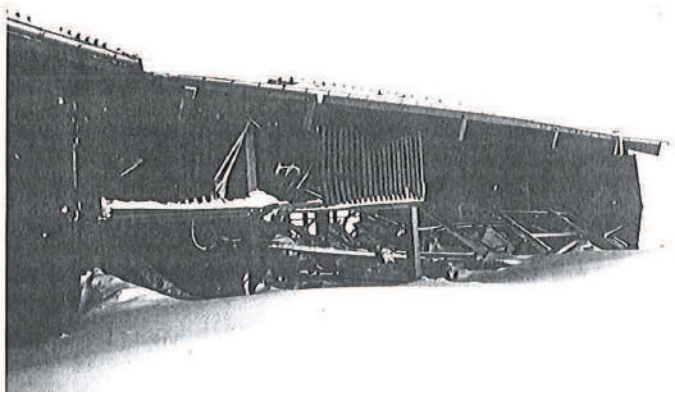

Abbildung 5.13: Grundriss (nicht maßstäblich): Mittelstation der Kabelumlaufbahn, Staudruckverteilung am lawinenzugewandten Gebäudeteil in [kN/m$^2$] (aus: Tschom, 1984).




(a)

(b)

Abbildung 5.14: Übersichtsbilder der Schiltilawine: (a) Einzugsgebiet; (b) Lawinenauffangdämme zum Schutz der Mittelstation der Gondelbahn(aus: Tschom, 1984).



(a)

(b)

Abbildung 5.15: Schadensbilder Schiltilawine: (a) NO-Teil der Mittelstation (lawinenzugekehrter Bereich) stark beschädigt; (b) SW-Teil der Mittelstation (lawinenabgekehrter Bereich) (aus: Tschom, 1984).

Tabelle 5.8: Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Verwalllawine (nach: Tschom, 1986).

| Datum | Lawine | Ort | Objekt | Welche Bauteile des Objektes wurden beschädigt bzw. nicht beschädigt? | Zerstörungsd. **L.e.** [kN/m$^2$] | Zerstörungsd. **L.n.e.** [kN/m$^2$] | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 01/02/1986 | Verwalllawine | Ötztal; Gemeinde Obergurgl | Hotel Hochfirst | Beschädigungen des Hallenbads; große Fensterflächen (6 mm verglast) beschädigt | - | - | Beschädigungen des Hallenbades lassen sich nicht konkret nachrechnen. Die Tatsache, dass Fensterflächen mit 6 mm Verglasung dem Lawinendruck nicht standhalten ist nicht neu. |
| | | | Haus „Verwall“ | Kamin (47 x 47 cm) 1.25 m über Dach abgeschert; Vordach teilweise eingedrückt (Kragweite 1.14 m) | 18.9 | - | Der Zerstörungsdruck (L.e.) reicht aus, dass der Sparren der Belastung nicht mehr standhält. |
| | | | Stahlmasten der TIWAG Masttype+4 | Stahlmasten der TIWAG zerstört | 16.8 | - | Der Zerstörungsdruck (L.e.) reicht aus, dass das Auflager des Mastens zerstört wird. Die Trümmer einer bergseitig aufgestellten Baracke verfingen sich im Masten und erhöhen dadurch die Angriffsfläche der Lawine im untersten Teil des Gittermasten. |
| 1984/85 | Verwalllawine | Ötztal; Gemeinde Obergurgl | Stahlmasten der TIWAG Masttype+4 | Stahlmasten der TIWAG nicht zerstört | - | 19.4 | Ähnlicher Lawinenabgang wie 1986, jedoch war damals noch keine Baracke vorhanden. Der Zerstörungsdruck (L.n.e.) ergibt sich aus der Tatsache, dass bei einer höheren Belastung der Masten bereits 1984 zerstört worden wäre. |
| | | | | Zusammenfassung: Aus den berechneten Drücken lässt sich auf eine wahrscheinliche „statische Lawinenlast“ von 19.15 kN/m$^2$ schließen. | | | |

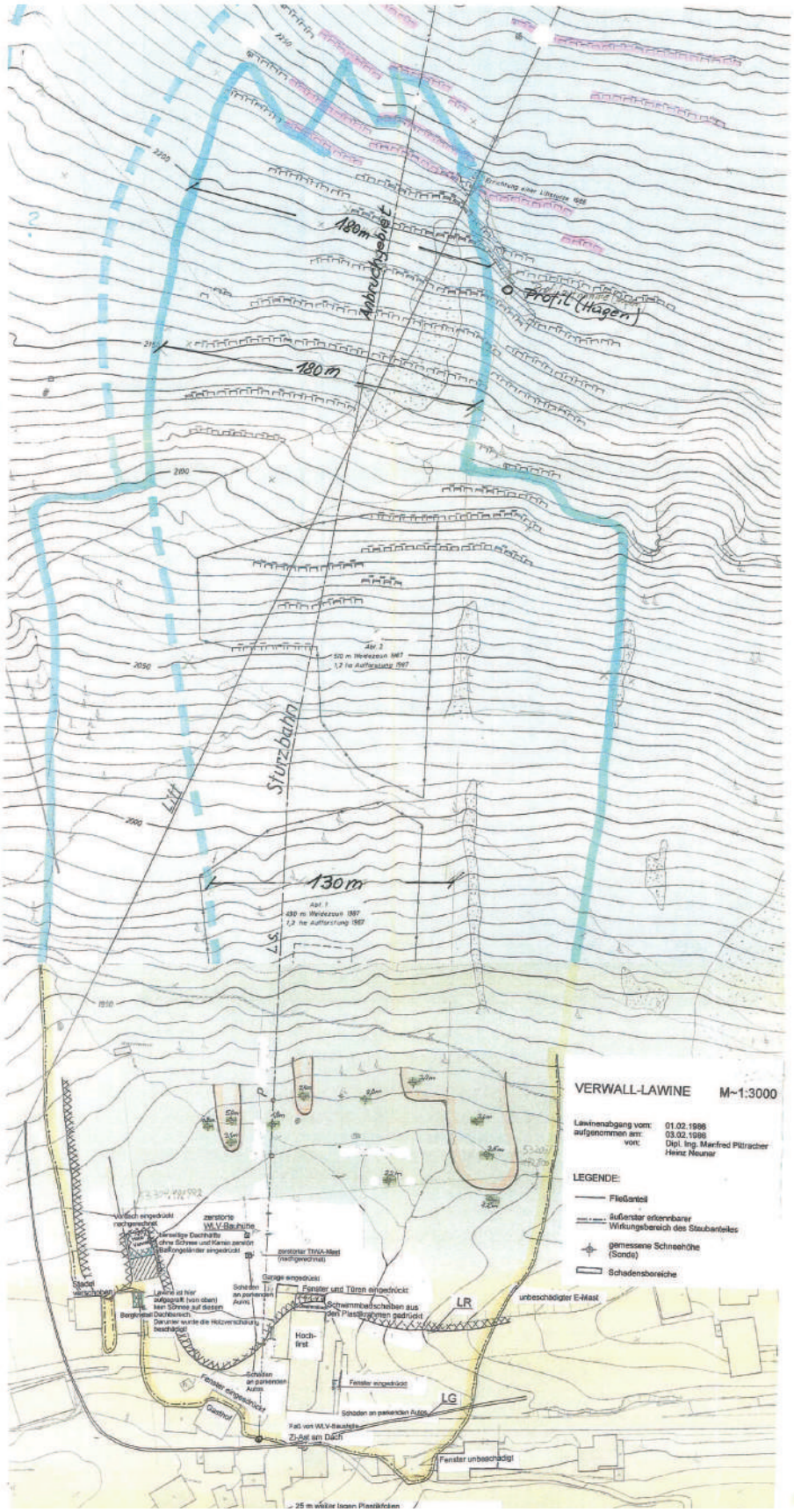



Abbildung 5.16: Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Verwalllawine (aus: SSL, 2015).

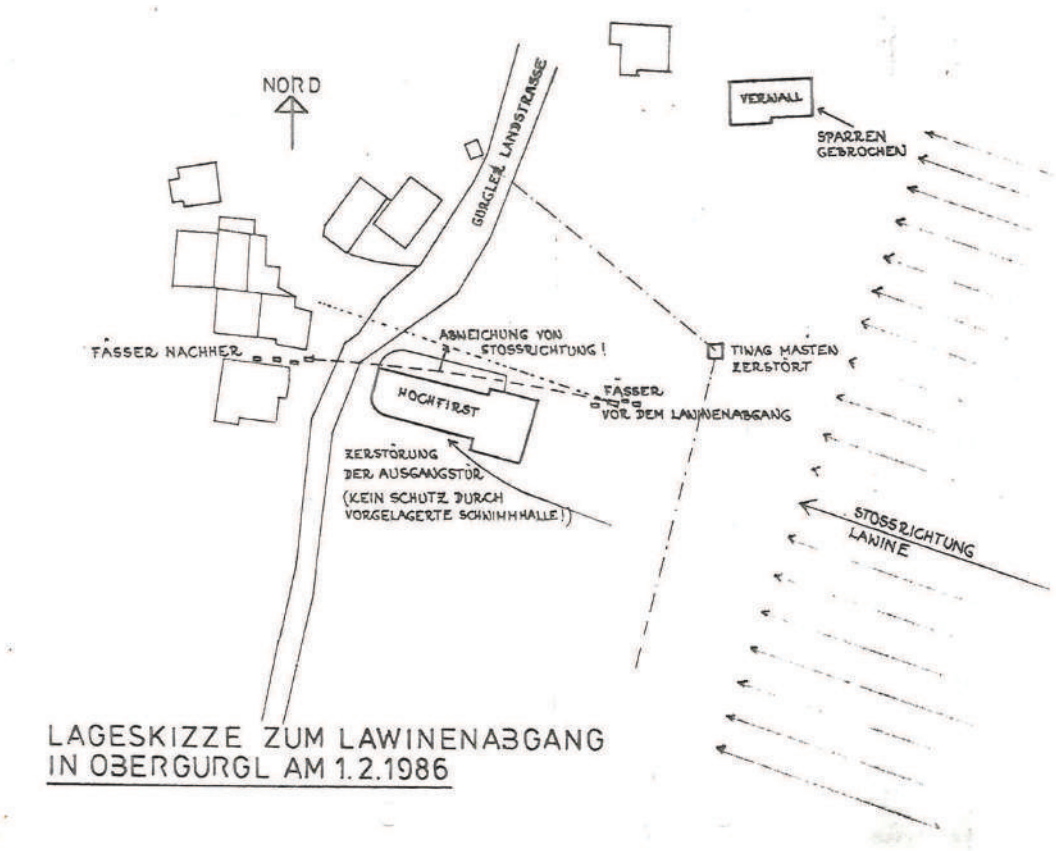



Abbildung 5.17: Lageskizze (nicht maßstäblich): Abgang der Verwalllawine in Obergurgl, 1986 (aus: Tschom, 1986).

Tabelle 5.9: Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Wolfsgrubenlawine (nach: Tschom, 1988).

| Datum | Lawine | Ort | Objekt | Welche Bauteile des Objektes wurden beschädigt bzw. nicht beschädigt? | Zerstörungsd. **L.e.** [kN/m$^2$] | Zerstörungsd. **L.n.e.** [kN/m$^2$] | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13/03/1988 | Wolfsgrubenlawine | Gemeinde St.Anton - Nasserein | Fahrleitungsmasten der ÖBB | | - | - | Keine Detailangaben, da solche Masten bereits bei geringem seitlichen Schub verbogen (Biegedrillknicken - Abdrehen im unteren Drittelbereich) werden. Daher ist eine Rückrechnung nicht zielführend. |
| | | | Leitschienen im Bereich der Straße | | - | - | Die Leitschiene weist nur eine geringe Angriffsfläche auf ist mit 2 rohen Schrauben M16 im Abstand von 3.66 m befestigt. Langlöcher schmälern den Wert aller Berechnungsvarianten. Die Berechnungen liefern kaum brauchbare Ergebnisse. |
| | | | Schutzverbauung der ÖBB (Schneebrücke SD 2-16-ÖBB) bei KM 98.4/6 der Strecke Innsbruck - Bludenz | | - | Aerosole: 17.54<br>Law.masse: 14.70 | Bei Überschreitung des angegebenen Zerstörungsdruckes (L.n.e.) wäre die Schneebrücke gekippt und somit kann der Zerstörungsdruck (L.n.e.) berechnet werden. |
| | | | Wohnhaus Zangerl | Rissbildung im Themozellmauerwerk des obersten Geschosses (aufgrund der Dachverankerung) | 13.64 | 14.37 | Der Zerstörungsdruck (L.e.) reicht um einen Riss zu verursachen. Der Zerstörungsdruck (L.n.e.) errechnet sich daraus, dass die Risse bei gleicher Wandausführung in den unteren Geschossen gefehlt haben. (Sogwirkung hat dort weitestgehend gefehlt) |
| | | | Doppelwohnhaus „Tschol“ | Ausknicken von Pfeiler | 7.50 | - | Der angegebene Zerstörungsdruck (L.e.) (parallel zur Böschung) reicht aus, um diesen Pfeiler zu knicken. |
| | | | | Zusammenfassung: Bei der Angabe eines Endergebnisses für die „statischen Lawinenlast“ parallel zum Hang (also 30° gegen die Horizontale) müssen Schwankungen ($\mp$ 15 %) in den Materialkennwerten und sonstige Unsicherheiten berücksichtigt werden. Somit ergibt sich ein Zerstörungsdruck (L.e.) von 13.65 - 15 % = 11.60 kN/m$^2$ und ein Zerstörungsdruck (L.n.e.) von 14.37 + 15 % = 16.50 kN/m$^2$. | | | |

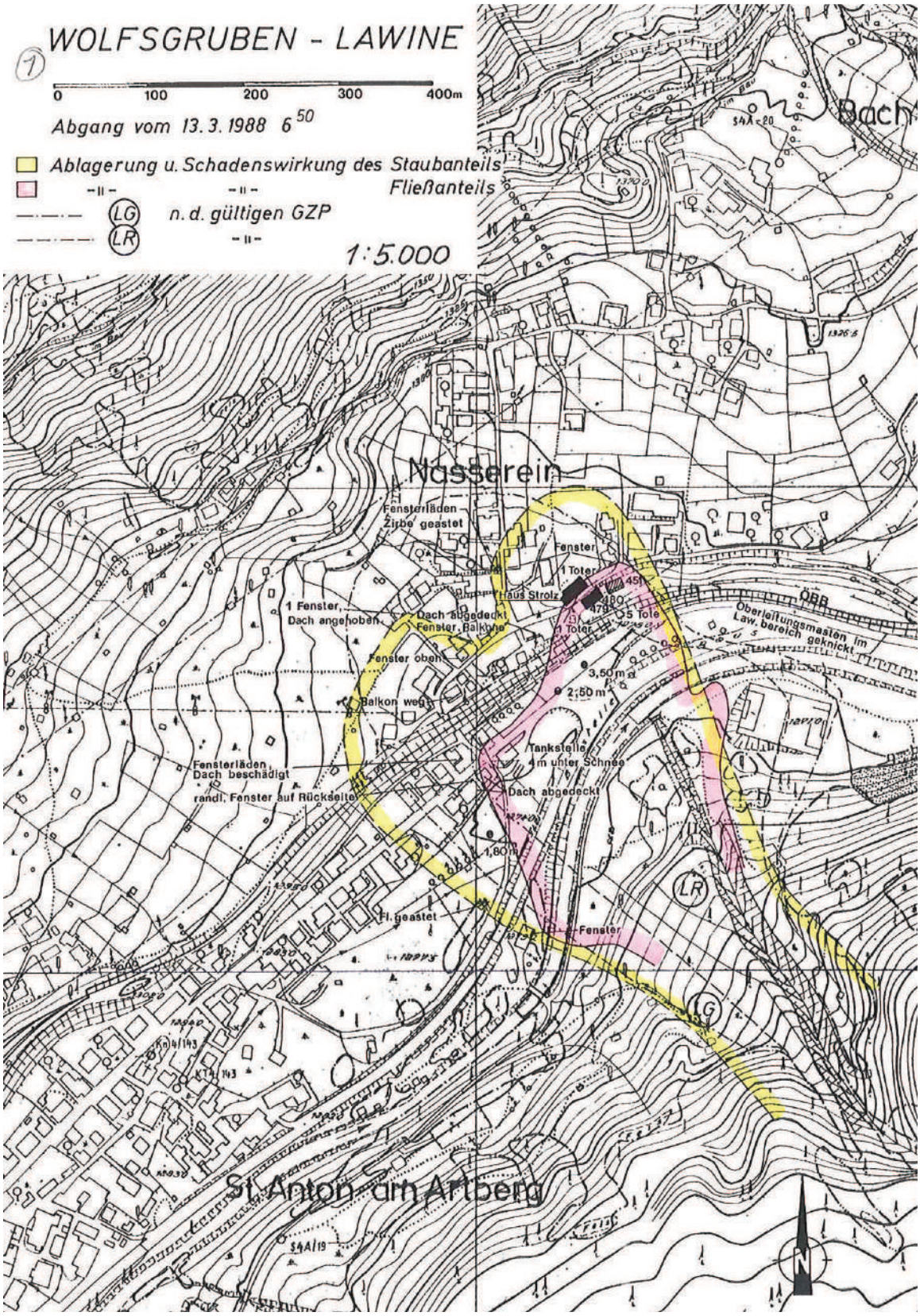



Abbildung 5.18: Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Wolfsgrubenlawine (aus: SSL, 2015).

Tabelle 5.10: Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes der Wasserleiterlawine (nach: Tschom, 2000).

| Datum | Lawine | Ort | Objekt | Welche Bauteile des Objektes wurden beschädigt bzw. nicht beschädigt? | Zerstörungsd. **L.e.** [kN/m$^2$] | Zerstörungsd. **L.n.e.** [kN/m$^2$] | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23/02/1999 | Wasserleiterlawine | Gemeinde Galtür | Bereich West (Landle): Haus Zangerl Albert | Kamin wurde nicht beschädigt; Garage und Stadel (beide in Holzbauweise) wurden zerstört; Stall aus gebrannten Ziegeln blieb trotz fehlender Decke stehen | - | 10 | - |
| | | | Bereich West (Landle): Pension Salner am unmittelbaren Rand der Hauptstoßrichtung | Glaskobel vor dem Haus wird zerstört; beide östlichen Schwenkfenster 230 x 140 cm im EG werden eingedrückt; Türen des OG links und rechts des Treppenhauses werden eingedrückt, wobei die Türe gegenüber des Treppenhauses unbeschädigt bleibt; gleich großes Fenster westlich vom Eingang unbeschädigt; | - | 10 | - |
| | | | Haus Litzner | total zerstört | Terrain: 48.11 Traufenhöhe: 37.73 | - | In diesem Bereich trat die größte Lawinenintensität, sowohl vom Fließ- als auch vom Staubanteil, auf. Für die vollständige Zerstörung vom Haus Litzner ist mit großer Wahrscheinlichkeit der Fließanteil verantwortlich, wobei der Anteil der Aerosole (Aerosolhöhe 45.0 m) nicht nachgewiesen werden kann. |
| | | | Haus Walter Mathias im „Schatten“ des zerstörten Hauses Litzner | Deckeneinsturz; Decken über den Gästeräumen widerstehen der Belastung; Stadl zerstört | Terrain: 34.08 Traufenhöhe: 26.61 | - | Der schräg von oben gerichtete Staubanteil (Aerosolhöhe 32.0 m) der Lawine ist für die Zerstörung des Hauses Walter verantwortlich, da dieser vor dem Fließanteil auf das Gebäude trifft. |
| | | | Doppelhaus Zangerl Paula, Zangerl Marlene | vollkommen zerstört | 19.4 | - | Beim angegebenen Zerstörungsdruck (L.e.) kommt es zum Schubbruch und damit zum Versagen des „Rückgrates“ des Gebäudes. Der selbe Zerstörungsdruck (L.e.) ergibt sich unter der Annahme, dass das Gebäude auf der Pappeunterlage gleitet. Die Untersuchung des Bruchmechanismus „Überschreitung der Biegezugfestigkeit“ brachte keine zielführenden Ergebnisse. Die Zerstörung wurde hauptsächlich durch den horizontal über das Eck gerichteten Staubanteil hervorgerufen. |
| | | | Doppelhaus Ladner Ursula, Jehle Werner | Dächer praktisch unbeschädigt; | Terrain: 12.3 | - | Der Aerosoldruck auf 9.55 m Höhe (Firsthöhe) kann mit Null angenommen werden, da die Dächer praktisch unbeschädigt waren. Die Zerstörung wurde hauptsächlich durch den horizontal über das Eck gerichteten Staubanteil hervorgerufen. |
| | | | Garage des Hauses Jehle | wenig beschädigtes Haus; Biegebruch der hinteren Wand | 13.33 | - | Die hintere Wand erleidet beim angegebenen Zerstörungsdruck (L.e.) einen Biegebruch. |
| | | | Haus Lorenz Gottlieb | Außenwände und insbesondere der der Lawine zugekehrte Mauerwerkspfeiler bleiben unbeschädigt. | - | Aerosol: 18.3 | Die drei Fenster in der Küche können solchen Drücken nicht standhalten, sodass der Tod von drei in der Küche befindlichen Personen erklärbar ist. |
| | | | Randbereich Ost: Haus Zauser Bruno, Tischlerei Mattle Siegbert, Bereich Sportplatz (Vorrangig Einfluss der Weiße Riefe-Lawine) | Zerstörte Fenster, 8-eckiger Flutlichtmasten umgeworfen | 12 | - | Der Zerstörungsdruck (L.e.) ergibt sich aus der Tatsache, dass die Fenster der Tischlerei Mattle Siegbert dem Lawinendruck aus der Kombination von zwei gleichzeitig niedergehenden Lawinen nicht standhalten konnten. Aus der Rückrechnung des Zerstörungsdruckes (L.e.) auf den 8-eckigen Flutlichtmasten des Sportplatzes konnte kein aussagekräftiges Ergebnis gewonnen werden, da die Angriffsfläche nur sehr ungenau bestimmt werden konnte. |

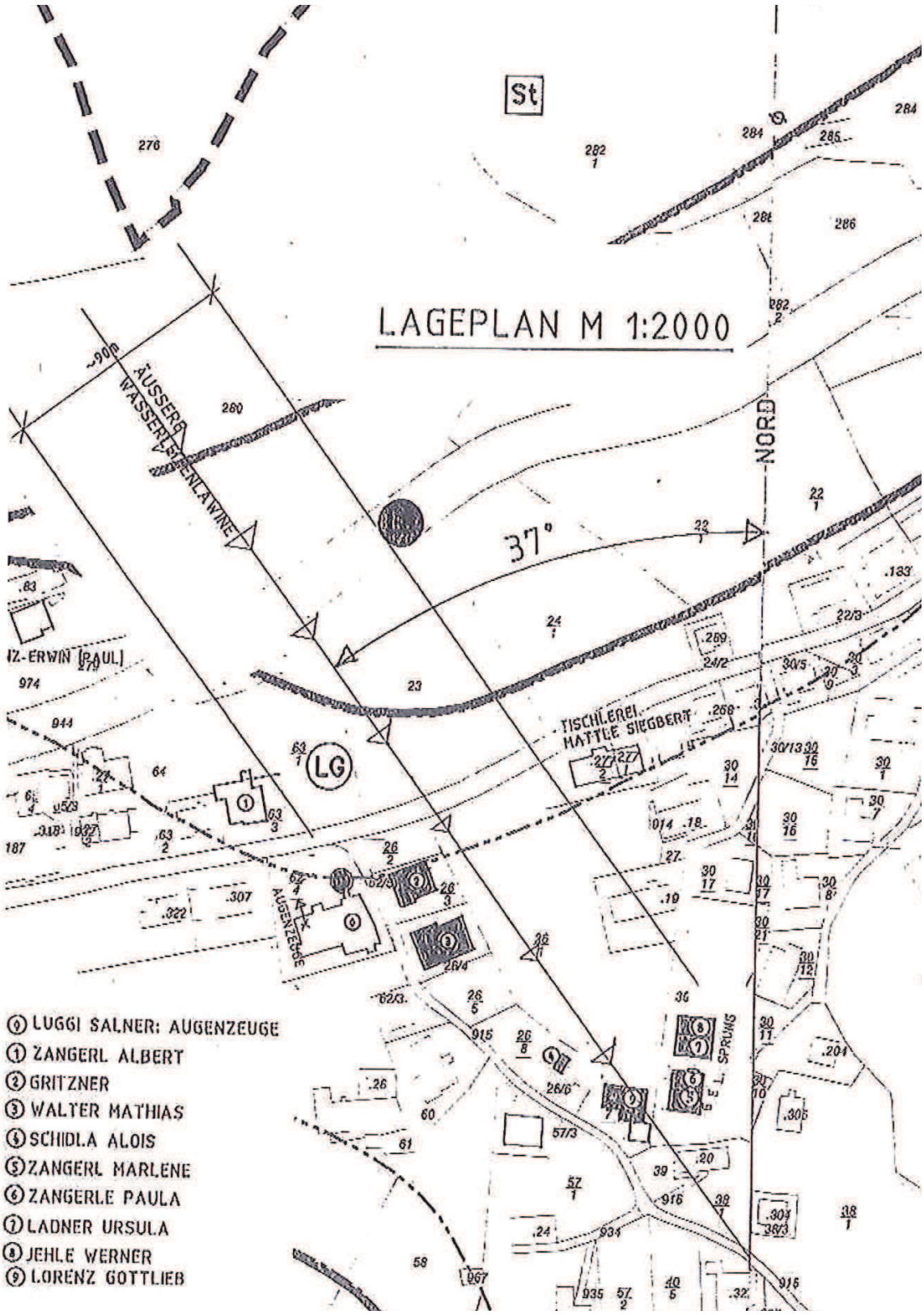
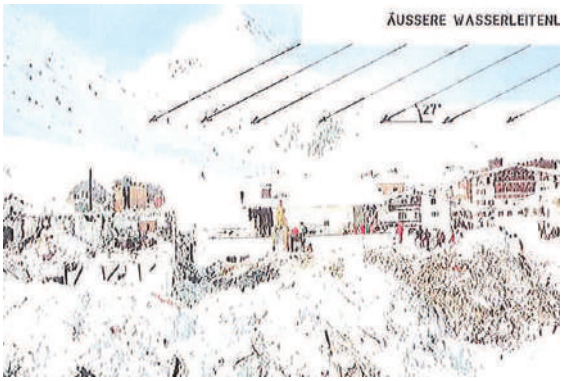



Abbildung 5.19: Übersichtsplan (nicht maßstäblich): Wasserleiterlawine (aus: Tschom, 2000).

(a)




(b)

Abbildung 5.20: Schadensbilder: (a) Pension Salner; (b) total zerstörtes Haus Litzner (aus: Tschom, 2000).

(a)

(b)

Abbildung 5.21: Schadensbilder des Hauses Walter Mathias (aus: Tschom, 2000).

(a)

(b)

Abbildung 5.22: Schadensbilder des Doppelhauses Zangerl Paula und Zangerl Marlene (aus: Tschom, 2000).

## 5.4 Weiteres Beispiel einer Rückrechnung - Helikopter

Am 19.Februar 2014 wurde ein Helikopter von „Selkirk Tangiers Heli Skiing (STHS)“ östlich von Revelstocke (British Columbia) an einem als „sicher“ eingestuften Landeplatzes von einer Lawine erfasst (siehe Abbildung 5.23). Der Helikopter wurde ausschließlich durch den Luftstoß der Lawine angehoben und fiel 10 m von der Anlegestelle entfernt wieder auf den Boden. Beim selben Ereignis kamen außerdem viele Bäume zu Schaden. Die technischen Details zur Lawine lauten wie folgt (Honig et al., 2014):

- Größe 3 (mit Tabelle 3.4 klassifiziert), natürliche Auslösung
- Höhe des Abbruchgebiets: 2260 m
- Höhe des Ablagerungsgebiets: 1432 m
- Neigung Abbruchgebiet: 45 - 50 °
- Anrissbreite: 250 m
- durchschnittliche Anrissmächtigkeit: 60 - 150 cm (bis maximal 500 cm)
- Ablagerung: 250 m lang x 80 m breit x 6 m tief (geschätzt)

Mit diesen Daten wurde von Honig et al. (2014) eine Lawinensimulation mit dem Software - Paktet RAMMS (RApid Mass Movement Simulation), welches vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF entwickelt wurde, durchgeführt. Mit der daraus resultierenden Geschwindigkeit konnte jene Kraft abgeschätzt werden, welche wahrscheinlich für das Umwerfen des Helikopters verantwortlich war (Honig et al., 2014).

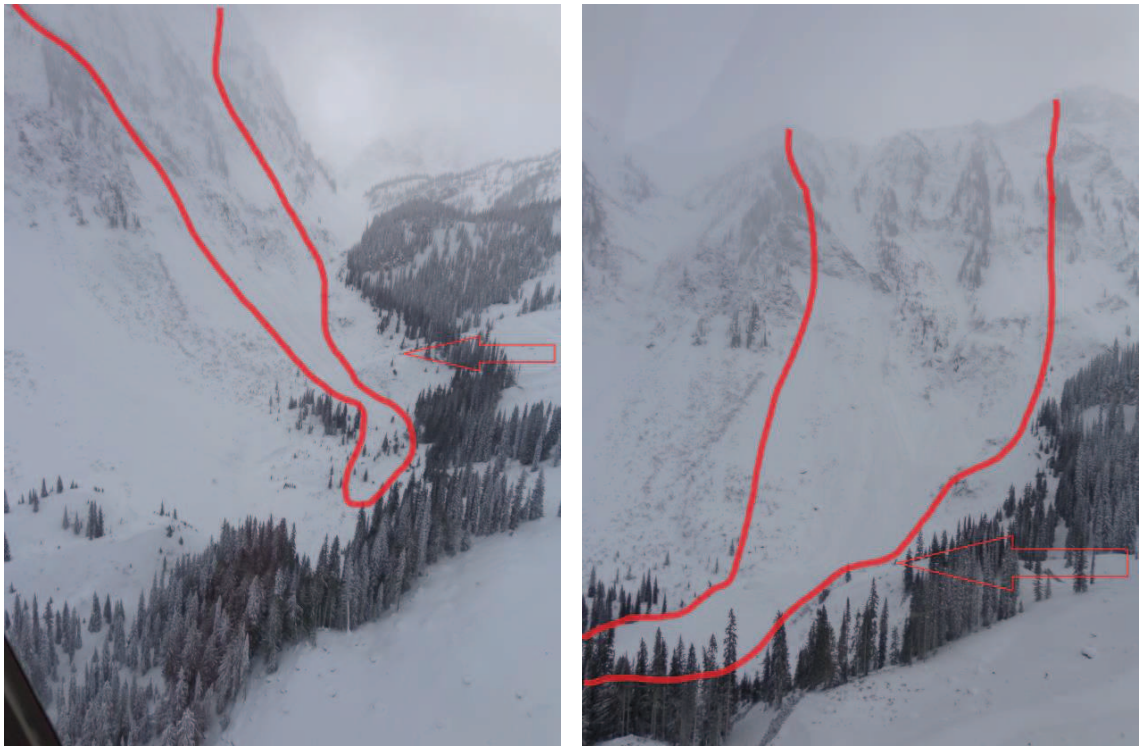
(a) (b)

Abbildung 5.23: Bilder zum Lawinenereignis in Revelstocke (British Columbia), 2014: (a) Umgeworfener und beschädigter Helikopter; (b) Helikopterlandeplatz (roter Kreis) und Ablagerungsgebiet in rot gekennzeichnet (aus: Honig et al., 2014).

Nach Honig et al. (2014) ergeben sich für die genannte Lawine folgende Simulationsergebnisse mit dem Software - Paket RAMMS:

- Fließschicht: Höhe: 2 - 3 m, Dichte: 200 - 300 kg/m$^3$
- Staubschicht: Höhe an der Lawinenfront: 20 m, Frontgeschwindigkeit: rund 50 m/s, maximalen Dichte: zwischen 3 und 6 kg/m$^3$

- am Helikopterlandeplatz:
  - maximale Geschwindigkeit: 30 m/s
  - maximale Dichte: 5 kg/m$^3$
  - maximaler Staublawinendruck: $>$ 5 kPa
  - maximaler Staublawinendruck mit halber Anrissmächtigkeit gerechnet: 1 kPa
  - Staublawinendruck auf den Helikopter für 5 s: $>$ 3 kPa



(a) (b)

Abbildung 5.24: Übersichtbild der Lawine und des Helikopterlandeplatzes (roter Pfeil)(aus: Honig et al., 2014).

Mithilfe eines vereinfachten Modells (siehe Abbildung 5.25) kann man annäherungsweise jene Kraft berechnen, welche benötigt wird, um den Helikopter umzuwerfen. Nach Honig et al. (2014) werden folgende Annahmen getroffen:

- Gesamtgewicht Helikopter: 3200 kg bzw. 32 kN
- Gesamtgewicht wird zu gleichen Teilen auf die beiden Fahrwerke aufgeteilt $W = \frac{32}{2} = 16\,kN$
- Druckverteilung ist nicht homogen über die gesamte Helikopterseitenfläche (23.2 m$^2$), sondern besteht aus konzentrierten Böen über kleinere effektive Flächen
- Druckwirkung auf eine effektiv wirksame Fläche $A = 10\,\mathrm{m}^2$ (größere Flächen würden den erforderlichen Mindestdruck reduzieren)
- Hebelarm $h = 1.5\,\mathrm{m}$ (ca. die Hälfte der Gesamthöhe) über dem Boden und der Fahrwerkabstand $d = 2\,\mathrm{m}$

Aus den obigen Annahmen und der Abbildung 5.25 ergibt sich nach Honig et al. (2014) der nötige Druck $p$, um den Helikopter umzuwerfen, zu:

$$p = \frac{W\,d}{A\,h} = \frac{16 \cdot 2}{10 \cdot 1.5} = 2.2\,\text{kPa}. \tag{5.31}$$

Anhand dieser Abschätzung sieht man, dass eine Staublawine mit einem Druck von $p = 5\,\text{kPa}$ einen Helikopter problemlos umwerfen kann. Jedoch gibt es viele zusätzliche Faktoren, welche das Umwerfen des Helikopters beeinflussen. Diese sind zum Beispiel die Orientierung des Helikopters am Landeplatz, die Stellung der Rotorblätter oder die aufgetretene Luftstoßrichtung. Diese war aufgrund von Verwirbelungen wahrscheinlich von unten nach oben (Honig et al., 2014).

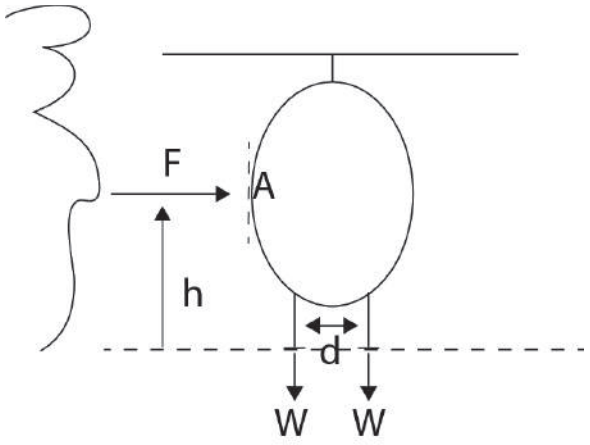



Abbildung 5.25: Prinzipskizze zur Berechnung des Druckes $p$, welcher zum Umwerfen des Helikopters erforderlich war (aus: Honig et al., 2014).

Um neue Modellansätze großer Staublawinen zu testen sind gut dokumentierte Ereignisse sehr wertvoll (Honig et al., 2014).

KAPITEL 6

# Rückrechnung auf den Zerstörungsdruck auf Basis aktueller Normen

Im Kapitel 6 wird der Zerstörungsdruck auf das Haus Zangerl Paula auf Basis aktueller Normen und Literatur rückgerechnet. Zum Vergleich des vereinfachten Modells des Obergeschosses (OG: drei Wandscheiben) nach Tschom (2000) werden im ersten Abschnitt dieses Kapitels die Scheibenkräfte, unter Berücksichtigung aller Wandscheiben, berechnet. Nach Tschom (2000) stellt das Schubversagen der Wandscheibe Sx2 das maßgebende Versagen für die Zerstörung des Hauses dar. Mit dieser Annahme wird im zweiten Abschnitt dieses Kapitels der Zerstörungsdruck mit der aktuellen Norm rückgerechnet.

## 6.1 Berechnung der Wandscheibenkräfte

Grundsätzlich ist die folgende Berechnung von Wandscheibenkräften ähnlich zu der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Vorgangsweise. Der Unterschied zu der Berechnung der Wandscheibenkräfte nach Tschom (2000) liegt darin, dass in diesem Abschnitt alle Wandscheiben des Obergeschosses des Haus Zangerl Paula mitberücksichtigt werden und eine horizontale Lawinendruckkraft in x- und y - Richtung angesetzt wird.

Die Ermittlung von Wandscheibenkräften dieses statisch unbestimmten Wandscheibensystem (siehe Abbildung 6.1) erfolgt unter den Voraussetzungen einer starren Deckenplatte, einer über die Höhe konstanten Steifigkeit der Wandscheiben und einem konstanten Elastizitätsmodul $E$ für alle Wände. Wenn die resultierenden Lawinendruckkräfte $H_x$ bzw. $H_y$ nicht durch den Schubmittelpunkt $M_0$ gehen, findet eine Verschiebung und eine Verdrehung der starren Deckenscheibe statt. $H_x$ bzw. $H_y$ werden im Schubmittelpunkt angesetzt und dadurch wird zusätzlich zu den resultierenden Horizontalkräften ein Torsionsmoment $M_{T,zuf.Hx}$ bzw. $M_{T,zuf.Hy}$ erzeugt. Dadurch lässt sich die Berechnung der Wandscheibenkräfte in einen Verschiebungsanteil infolge $H_x$ bzw. $H_y$ und einen Verdrehungsanteil infolge $M_{T,zuf.Hx}$ bzw. $M_{T,zuf.Hy}$ um den Schubmittelpunkt $M_0$ aufteilen. Voraussetzung ist die Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen:

$$\sum H_x = 0 \tag{6.1}$$

$$\sum H_y = 0 \tag{6.2}$$

$$\sum M_T = 0. \tag{6.3}$$

Die nachfolgende Berechnung der Wandscheibenkräfte dieses statisch unbestimmten Wandscheibensystems orientiert sich an der von Wommelsdorff und Albert (2012) beschriebenen Vorgehensweise. In einem ersten Schritt wird eine Skizze des Systems und der Belastung angefertigt, welche in Abbildung 6.1 dargestellt ist.

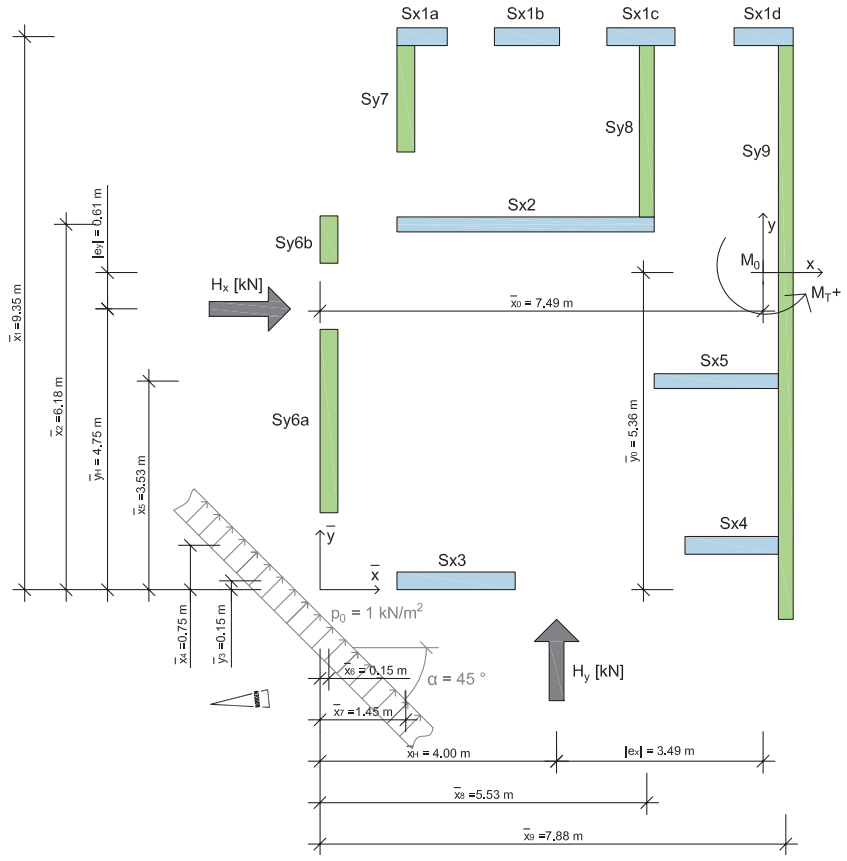



Abbildung 6.1: System (nicht maßstäblich) und Belastung des Obergeschosses des Hauses Zangerl Paula (nach: Tschom, 2000; Wommelsdorff und Albert, 2012).

Horizontalkräfte, welche nicht durch den Schubmittelpunkt gehen, erzeugen ein Torsionsmoment. Zur Berechnung dieser Torsionsmomente müssen die Horizontalkräfte $H_x$ bzw. $H_y$ und die Lastausmitten bzw. der Abstand der Kräfte zum Schubmittelpunkt $M_0$ berechnet werden.

Zur Berechnung der Horizontalkräfte wird wie in Abschnitt 5.2 ein angenommener Lawinendruck (eine sogenannte statische Ersatzlast) $p_0$ von $1\,\mathrm{kN/m^2}$ unter $\alpha = 45°$ auf das Haus Zangerl Paula angesetzt (siehe Abbildung 6.1). Damit ergibt sich mit einer abgeschätzten Einwirkungsfläche $A_{Ex}$ von $51.0\,\mathrm{m^2}$ eine resultierende Lawinendruckkraft in x - Richtung $H_x$ auf das Obergeschoss von:

$$H_x = A_{Ex}\, p_0\, \cos(\alpha) = 51.0 \cdot 1 \cdot \cos(45) = 36.06\,\mathrm{kN}. \tag{6.4}$$

Die resultierende Lawinendruckkraft in y - Richtung $H_y$ ergibt sich mit einer abgeschätzten Einwirkungsfläche $A_{Ey}$ von $53.6\,\mathrm{m^2}$ zu:

$$H_y = A_{Ey}\, p_0\, \cos(\alpha) = 53.6 \cdot 1 \cdot \cos(45) = 37.90\,\mathrm{kN}. \tag{6.5}$$

Anschließend wird der Schubmittelpunkt $M_0$ bestimmt, wobei nur der Biegewiderstand in der jeweiligen Haupttragrichtung x bzw. y angesetzt wird. Die Trägheitsmomente $I_{yi}$ bzw. $I_{xi}$ einer Wandscheibe werden, wie bei einem Träger, mit $t_i\, l_i^3/12$ berechnet. Die Tabellen 6.1 und 6.2 stellen die Eingangsgrößen für die Berechnung der Koordinaten des Schubmittelpunktes $M_0$ dar. Die in den Tabellen 6.1 und 6.2 angegebenen Abstände $\bar{y}_i$ bzw. $\bar{x}_i$ sind der Abbildung 6.1 zu entnehmen.

Tabelle 6.1: Berechnung der Eingangsgrößen zur Bestimmung der Koordinate $\bar{x_0}$ des Schubmittelpunktes $M_0$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Sxi | Länge $l_i$ [m] | Breite $t_i$ [m] | $\bar{y_i}$ [m] | $I_{yi}$ [m$^4$] | $I_{yi} \cdot \bar{y_i}$ [m$^5$] |
|---|---|---|---|---|---|
| Sx1a | 0.85 | 0.30 | 9.35 | $1.54 \cdot 10^{-2}$ | 0.14 |
| Sx1b | 1.10 | 0.30 | 9.35 | $3.33 \cdot 10^{-2}$ | 0.31 |
| Sx1c | 1.15 | 0.30 | 9.35 | $3.8 \cdot 10^{-2}$ | 0.36 |
| Sx1d | 1.00 | 0.30 | 9.35 | $2.5 \cdot 10^{-2}$ | 0.23 |
| Sx2 | 4.35 | 0.25 | 6.18 | 1.71 | 10.60 |
| Sx3 | 2.00 | 0.30 | 0.15 | 0.20 | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| Sx4 | 1.58 | 0.30 | 0.75 | $9.86 \cdot 10^{-2}$ | $7.4 \cdot 10^{-2}$ |
| Sx5 | 2.10 | 0.25 | 3.53 | 0.19 | 0.68 |

Tabelle 6.2: Berechnung der Eingangsgrößen zur Bestimmung der Koordinate $\bar{y_0}$ des Schubmittelpunktes $M_0$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Syi | Länge $l_i$ [m] | Breite $t_i$ [m] | $\bar{x_i}$ [m] | $I_{xi}$ [m$^4$] | $I_{xi} \cdot \bar{x_i}$ [m$^5$] |
|---|---|---|---|---|---|
| Sy6a | 3.10 | 0.30 | 0.15 | 0.74 | 0.11 |
| Sy6b | 0.80 | 0.30 | 0.15 | $1.28 \cdot 10^{-2}$ | $1.92 \cdot 10^{-3}$ |
| Sy7 | 1.80 | 0.30 | 1.45 | 0.15 | 0.21 |
| Sy8 | 2.90 | 0.25 | 5.53 | 0.51 | 2.81 |
| Sy9 | 9.70 | 0.25 | 7.88 | 19.01 | 149.83 |

Somit wird die Koordinate $\bar{x_0}$ des Schubmittelpunktes $M_0$ zu

$$\bar{x_0} = \frac{\sum I_{xi} \cdot \bar{x_i}}{\sum I_{xi}} = \frac{152.97}{20.43} = 7.49\,\text{m} \tag{6.6}$$

und die Koordinate $\bar{y_0}$ zu

$$\bar{y_0} = \frac{\sum I_{yi} \cdot \bar{y_i}}{\sum I_{yi}} = \frac{12.43}{2.32} = 5.36\,\text{m} \tag{6.7}$$

bestimmt. Der Schubmittelpunkt $M_0$ ist in der Abbildung 6.1 eingetragen. Mit den erhaltenen Koordinaten des Schubmittelpunktes können jetzt die Lastausmitten der Horizontalkräfte $H_x$ und $H_y$ in Bezug auf den Schubmittelpunkt $M_0$ ermittelt werden. Die

Lastausmitte $e_x$ der Horizontalkraft $H_y$ wird zu

$$e_x = \bar{x_H} - \bar{x_0} = 4.00 - 7.49 = -3.49\,\text{m} \tag{6.8}$$

und die Lastausmitte $e_y$ der Horizontalkraft $H_x$ zu

$$e_y = \bar{y_H} - \bar{y_0} = 4.75 - 5.36 = -0.61\,\text{m} \tag{6.9}$$

berechnet. Damit können jetzt die Torsionsmomente in Bezug auf den Schubmittelpunkt $M_0$ berechnet werden. Zufolge der Horizontalkraft $H_x$ und unter Berücksichtigung der positiven Drehrichtung (siehe Abbildung 6.1) wird ein Torsionsmoment von

$$M_{T,zuf.Hx} = -H_x\, e_y = -36.06 \cdot (-0.61) = 22.03\,\text{kNm} \tag{6.10}$$

und zufolge der Horizontalkraft $H_y$ ein Torsionsmoment von

$$M_{T,zuf.Hy} = H_y\, e_x = 37.90 \cdot (-3.49) = -132.23\,\text{kNm} \tag{6.11}$$

berechnet. Die in den Tabellen 6.3 und 6.4 berechneten Vorwerte sind für die Ermittlung der auf die einzelnen Wandscheiben entfallenden Lastanteile notwendig. Die Horizontalkräfte in den Wandscheiben zufolge Biegung $H_{xi,B}$ bzw. $H_{yi,B}$ werden dann wie folgt ermittelt:

$$H_{xi,B} = \frac{H_x\, I_{yi}}{\sum I_{yi}} \qquad [\text{kN}] \tag{6.12}$$

$$H_{yi,B} = \frac{H_y\, I_{xi}}{\sum I_{xi}} \qquad [\text{kN}] \tag{6.13}$$

Tabelle 6.3: Vorwerte zur Berechnung der auf die Wände entfallenden Lastanteile (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Sxi | $I_{yi}$ [m$^4$] | $y_i = \bar{y_i} - \bar{y_0}$ [m] | $I_{yi} \cdot y_i$ [m$^5$] | $I_{yi} \cdot y_i^2$ [m$^6$] |
|---|---|---|---|---|
| Sx1a | $1.54 \cdot 10^{-2}$ | 3.99 | $6.12 \cdot 10^{-2}$ | 0.24 |
| Sx1b | $3.33 \cdot 10^{-2}$ | 3.99 | 0.13 | 0.53 |
| Sx1c | $3.8 \cdot 10^{-2}$ | 3.99 | 0.15 | 0.61 |
| Sx1d | $2.5 \cdot 10^{-2}$ | 3.99 | $9.97 \cdot 10^{-2}$ | 0.40 |
| Sx2 | 1.71 | 0.82 | 1.40 | 1.15 |
| Sx3 | 0.20 | −5.21 | −1.04 | 5.43 |
| Sx4 | $9.86 \cdot 10^{-2}$ | −4.61 | −0.45 | 2.10 |
| Sx5 | 0.19 | −1.83 | −0.35 | 0.65 |

Tabelle 6.4: Vorwerte zur Berechnung der auf die Wände entfallenden Lastanteile (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Syi | $I_{xi}$ [m$^4$] | $x_i = \bar{x_i} - \bar{x_0}$ [m] | $I_{xi} \cdot x_i$ [m$^5$] | $I_{xi} \cdot x_i^2$ [m$^6$] |
|---|---|---|---|---|
| Sy6a | 0.74 | −7.34 | −5.47 | 40.11 |
| Sy6b | $1.28 \cdot 10^{-2}$ | −7.34 | $-9.39 \cdot 10^{-2}$ | 0.69 |
| Sy7 | 0.15 | −6.04 | −0.88 | 5.32 |
| Sy8 | 0.51 | −1.96 | −1.00 | 1.95 |
| Sy9 | 19.01 | 0.39 | 7.44 | 2.91 |

In den Gleichungen 6.12 und 6.13 werden die resultierenden Lawinendruckkräfte $H_x$ bzw. $H_y$ im Verhältnis der Trägheitsmomente $I_{xi}$ bzw. $I_{yi}$ der Wände auf diese aufgeteilt. Die Ergebnisse für $H_{xi,B}$ bzw. $H_{yi,B}$ für jede einzelne Wandscheibe sind in den Tabellen 6.5 und 6.6 angegeben. Dies sind die Kräfte, welche eine Verschiebung der starren Deckenplatte verursachen.

Weiters werden noch die Horizontalkräfte zufolge Torsion in den Wandscheiben bestimmt. Die Horizontalkräfte $H_{xi,T}$ und $H_{yi,T,zuf.Hx}$ zufolge des Torsionsmoments $M_{T,zuf.Hx}$ werden mit

$$H_{xi,T} = -\frac{M_{T,zuf.Hx}\, I_{yi}\, y_i}{C_\omega} \qquad [\text{kN}] \tag{6.14}$$

$$H_{yi,T,zuf.Hx} = \frac{M_{T,zuf.Hx}\, I_{xi}\, x_i}{C_\omega} \qquad [\text{kN}] \tag{6.15}$$

und die Horizontalkräfte $H_{xi,T,zuf.Hy}$ und $H_{yi,T}$ zufolge des Torsionsmoments $M_{T,zuf.Hy}$ mit

$$H_{xi,T,zuf.Hy} = -\frac{M_{T,zuf.Hy}\, I_{yi}\, y_i}{C_\omega} \qquad [\text{kN}] \tag{6.16}$$

$$H_{yi,T} = \frac{M_{T,zuf.Hy}\, I_{xi}\, x_i}{C_\omega} \qquad [\text{kN}] \tag{6.17}$$

berechnet. Die Horizontalkräfte zufolge Torsion sind jene Kräfte, welche eine Verdrehung der starren Deckenplatte verursachen. Der Wölbwiderstand $C_\omega$ errechnet sich für die Gleichungen 6.14 bis 6.20 zu:

$$C_\omega = \sum (I_{xi}\, x_i^2 + I_{yi}\, y_i^2) = 50.98 + 11.10 = 62.08\,\text{m}^6. \tag{6.18}$$

Die Ergebnisse der Berechnung der Horizontalkräfte zufolge Torsion sind wiederum in den Tabellen 6.5 und 6.6 aufgelistet. Weiters sind in diesen Tabellen die resultierenden Horizontalkräfte in den Wandscheiben $H_{xi}$ und $H_{yi}$ angeführt. Diese berechnen sich wie folgt:

$$H_{xi} = H_{xi,B} + H_{xi,T} + H_{xi,T,zuf.Hy} \qquad [\text{kN}] \tag{6.19}$$

$$H_{yi} = H_{yi,B} + H_{yi,T} + H_{yi,T,zuf.Hx} \qquad [\text{kN}]. \tag{6.20}$$

Tabelle 6.5: Ermittlung der Kräfte in den Wandscheiben Sxi zufolge $p_0 = 1$ kN/m$^2$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Sxi | $I_{yi}$ [m$^4$] | $H_{xi,B}$ [kN] | $I_{xi} \cdot y_i$ [m$^5$] | $H_{xi,T}$ [kN] | $H_{xi,T,zuf.Hy}$ [kN] | $H_{xi}$ [kN] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sx1a | $1.54 \cdot 10^{-2}$ | 0.24 | $6.12 \cdot 10^{-2}$ | $-2.17 \cdot 10^{-2}$ | 0.13 | 0.35 |
| Sx1b | $3.33 \cdot 10^{-2}$ | 0.52 | 0.13 | $-4.71 \cdot 10^{-2}$ | 0.28 | 0.75 |
| Sx1c | $3.8 \cdot 10^{-2}$ | 0.59 | 0.15 | $-5.38 \cdot 10^{-2}$ | 0.32 | 0.86 |
| Sx1d | $2.5 \cdot 10^{-2}$ | 0.39 | $9.97 \cdot 10^{-2}$ | $-3.54 \cdot 10^{-2}$ | 0.21 | 0.57 |
| Sx2 | 1.71 | 26.68 | 1.40 | −0.50 | 2.99 | 29.17 |
| Sx3 | 0.20 | 3.11 | −1.04 | 0.37 | −2.22 | 1.26 |
| Sx4 | $9.86 \cdot 10^{-2}$ | 1.53 | −0.45 | 0.16 | −0.97 | 0.73 |
| Sx5 | 0.19 | 3.00 | −0.35 | 0.13 | −0.75 | 2.37 |

Tabelle 6.6: Ermittlung der Kräfte in den Wandscheiben Syi zufolge $p_0 = 1$ kN/m$^2$ (nach: Wommelsdorff und Albert, 2012).

| Wand Syi | $I_{xi}$ [m$^4$] | $H_{yi,B}$ [kN] | $I_{xi} \cdot x_i$ [m$^5$] | $H_{yi,T}$ [kN] | $H_{yi,T,zuf.Hx}$ [kN] | $H_{yi}$ [kN] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sy6a | 0.74 | 1.38 | −5.47 | 11.64 | −1.94 | 11.09 |
| Sy6b | $1.28 \cdot 10^{-2}$ | $2.38 \cdot 10^{-2}$ | $-9.39 \cdot 10^{-2}$ | 0.20 | $-3.33 \cdot 10^{-2}$ | 0.19 |
| Sy7 | 0.15 | 0.27 | −0.88 | 1.88 | −0.31 | 1.83 |
| Sy8 | 0.51 | 0.94 | −1.00 | 2.12 | −0.35 | 2.71 |
| Sy9 | 19.01 | 35.28 | 7.44 | −15.84 | 2.64 | 22.08 |

Aus den Tabellen 6.5 und 6.6 ist ersichtlich, dass die Wandscheibe Sx2 mit einer Horizontalkraft $H_{xi}$ bzw. $X_2$ von 29.17 kN, zufolge $p_0 = 1\,\text{kN/m}^2$, die am stärksten belastete Wandscheibe darstellt. Die berechnete Horizontalkraft $X_2$ nach Tschom (2000) ist mit 27.29 kN annähernd gleich groß wie die nach Wommelsdorff und Albert (2012) berechnete Kraft. Die Gründe dafür können sein:

- Ein Anprallwinkel von 45 ° hat zwei ungefähr gleich große Lawinendruckkräfte in x- und y - Richtung zur Folge.
- Die Abmessungen des Grundrisses des Hauses Zangerl Paula sind annähernd quadratisch und die daraus resultierenden Einwirkungsflächen in x- und y - Richtung sind ungefähr gleich groß. Außerdem ist die Aufteilung der Wände in x- und y - Richtung flächenmäßig annähernd gleich.

## 6.2 Berechnung des Zerstörungsdruckes

Nach Tschom (2000) stellt das Schubversagen der Wandscheibe Sx2 das maßgebende Versagen für die Zerstörung des Obergeschosses des Hauses Zangerl Paula dar. In diesem Abschnitt wird der Zerstörungsdruck über das Schubversagen der Wandscheibe Sx2 auf Basis aktueller Normen rückgerechnet. Die Abmessungen dieser Wand sind in Tabelle 6.7 zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Abmessungen der Wandscheibe Sx2 (nach: Tschom, 2000).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Länge | $l$ | m | 4.35 |
| Dicke | $t$ | m | 0.25 |
| Höhe | $h$ | m | 2.55 |

Die Wandscheibe Sx2 besteht aus einem Ziegelmauerwerk und deshalb ist für die Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten die ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) heranzuziehen. Zusätzlich ist für Festlegungen von Mauermörtel die ÖNORM EN 998-2 (2010) von Bedeutung. In der hier diskutierten Aufgabenstellung wird nicht auf der sicheren Seite liegend ein Bauteil bemessen, sondern der Zerstörungsdruck eines Bauteils ermittelt. Aus diesem Grund werden alle Kräfte und Spannungen auf der Einwirkungsseite, wie auch auf der Widerstandsseite, ohne die Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten berechnet. Nach ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) wird die charakteristische Schubtragfähigkeit $V_R$ wie folgt berechnet:

$$V_R = f_{vk}\, t\, l_c \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{6.21}$$

mit

$f_{vk}$ charakteristische Schubfestigkeit des Mauerwerks in [kN/m$^2$]
$t$ Wanddicke in [m]
$l_c$ Länge des überdrückten Teils der Wand unter Vernachlässigung auf Zug beanspruchte Teile der Wand in [m].

Die charakteristische Schubfestigkeit $f_{vk}$ in Gleichung 6.21 wird mit

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\,\sigma \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{6.22}$$

berechnet. In Gleichung 6.22 stellt $f_{vk0}$ die charakteristische Haftscherfestigkeit (ohne Auflast) des Mauerwerks und $\sigma$ die Druckspannung rechtwinklig zur Schubkraft in der betrachteten Querschnittsebene dar. Der Wert 0.4 wird als Reibungsbeiwert $\mu$ interpretiert. Die Berechnung der Schubfestigkeit über Gleichung 6.22 setzt die Annahme eines Schubversagens in der Fuge zwischen Ziegel und Mörtel voraus und schließt ein Steinzugversagen aus. Tschom (2000) ging von einem Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K aus. Nach der derzeitig gültigen ÖNORM EN 998-2 (2010) für Mörtel im Mauerwerksbau entspricht dieser Mörtel ungefähr einem Mauermörtel M2.5, welcher eine Druckfestigkeit $f_c$ von 2.5 N/mm$^2$ aufweist. Nach ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) ergibt sich für die Mauermörtelgruppe M2.5 eine charakteristische Haftscherfestigkeit des Mauerwerks $f_{vk0}$ von 200 kN/m$^2$. Nach Wilhelm und Schustereder (2010) wird die Druckspannung rechtwinklig zur Schubkraft in der betrachteten Querschnittsebene $\sigma$ wie folgt berechnet:

$$\sigma = \frac{N_E}{t\, l_c} \qquad [\mathrm{kN/m^2}]. \tag{6.23}$$

Mit der unter Abschnitt 5.2 ermittelten vertikalen Druckspannung $\sigma_v$ von $323.09\,\mathrm{kN/m^2}$ auf die Wandscheibe Sx2 ergibt sich die einwirkende Normalkraft $N_E$ zu:

$$N_E = \sigma_v \, l \, t = 323.09 \cdot 4.35 \cdot 0.25 = 351.36\,\mathrm{kN} \tag{6.24}$$

Zur Berechnung der Gleichungen 6.21 und 6.23 wird unter anderem die überdrückte Wandlänge $l_c$ benötigt. Die Abbildung 6.2 (a) soll die Bedeutung von $l_c$ veranschaulichen und die für die Berechnung dieser Größe notwendigen Parameter erläutern. Die überdrückte Wandlänge $l_c$ wird für

$$e_E = \frac{M_E}{N_E} = \frac{H_E \, h}{N_E} > \frac{l}{6} \qquad [\mathrm{m}] \tag{6.25}$$

zu

$$l_c = 3 \left( \frac{l}{2} - e_E \right) \qquad [\mathrm{m}] \tag{6.26}$$

berechnet. Wenn man die Gleichung 6.26 gemeinsam mit der Abbildung 6.2 (a) betrachtet wird ersichtlich, dass man zur Bestimmung von $V_R$ eine Fallunterscheidung für die überdrückte Länge $l_c$ benötigt. Für den Fall $l_c \geq l$ wird die charakteristische Schubtragfähigkeit $V_R$ aus

$$V_R = t \, l \left( f_{vk0} + \mu \, \frac{N_E}{t \, l} \right) \qquad [\mathrm{kN}] \tag{6.27}$$

berechnet. Somit ist $V_R$ in diesem Bereich konstant. Für $l_c < l$ wird $V_R$ wie folgt bestimmt:

$$V_R = 3\,t \left( \frac{l}{2} - \frac{H_E \, h}{N_E} \right) \left( f_{vk0} + \mu \, \frac{N_E}{3\,t \left( \frac{l}{2} - \frac{H_E \, h}{N_E} \right)} \right) \qquad [\mathrm{kN}]. \tag{6.28}$$

Das bedeutet, dass in diesem Bereich $V_R$ linear abnimmt. Die Funktion von $V_R$ ist damit nicht linear. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 6.2 (b) die Horizontale Kraft $H_E$ über der charakteristischen Schubtragfähigkeit $V_R$ in einem Diagramm aufgetragen. In diesem Diagramm ist auch die Gerade $V_R = H_E$ eingezeichnet. Der Schnitt dieser Geraden mit der nicht linearen Funktion von $V_R$ ergibt die Horizontale Kraft $H_E$, welche zum Schubversagen der Wandscheibe Sx2 führt (rosa Punkt in Abbildung 6.2 (b)). Da die Wandscheibe bei Überschreiten eines gewissen Grenzwertes von $\sigma$, welcher mit der Druckfestigkeit eines Mörtels $f_c$ von $2.5\,\mathrm{N/mm^2}$ festgelegt wird, den Druckspannungen nicht mehr standhalten kann ist der Grenzwert von $l_c = 0.56\,\mathrm{m}$ (grüner Kreis in Abbildung 6.2 (b)).

Aus der Abbildung 6.2 (b) erkennt man, dass im Bereich $l_c < l$ das Schubversagen der Wandscheibe Sx2 eintritt. Aus diesem Grund kann mit der Bedingung $V_R = H_E$ und der Gleichung 6.28 die zum Schubversagen führende Horizontalkraft $H_E$ zu

$$H_E = \frac{2\,\mu\,N_E^2 + 3\,f_{vk0}\,l\,t\,N_E}{2\,N_E + 6\,f_{vk0}\,h\,t} = \frac{2 \cdot 0.4 \cdot 351.36^2 + 3 \cdot 200 \cdot 4.35 \cdot 0.25 \cdot 351.36}{2 \cdot 351.36 + 6 \cdot 200 \cdot 2.55 \cdot 0.25} = 223.49\,\mathrm{kN} \tag{6.29}$$

berechnet werden.

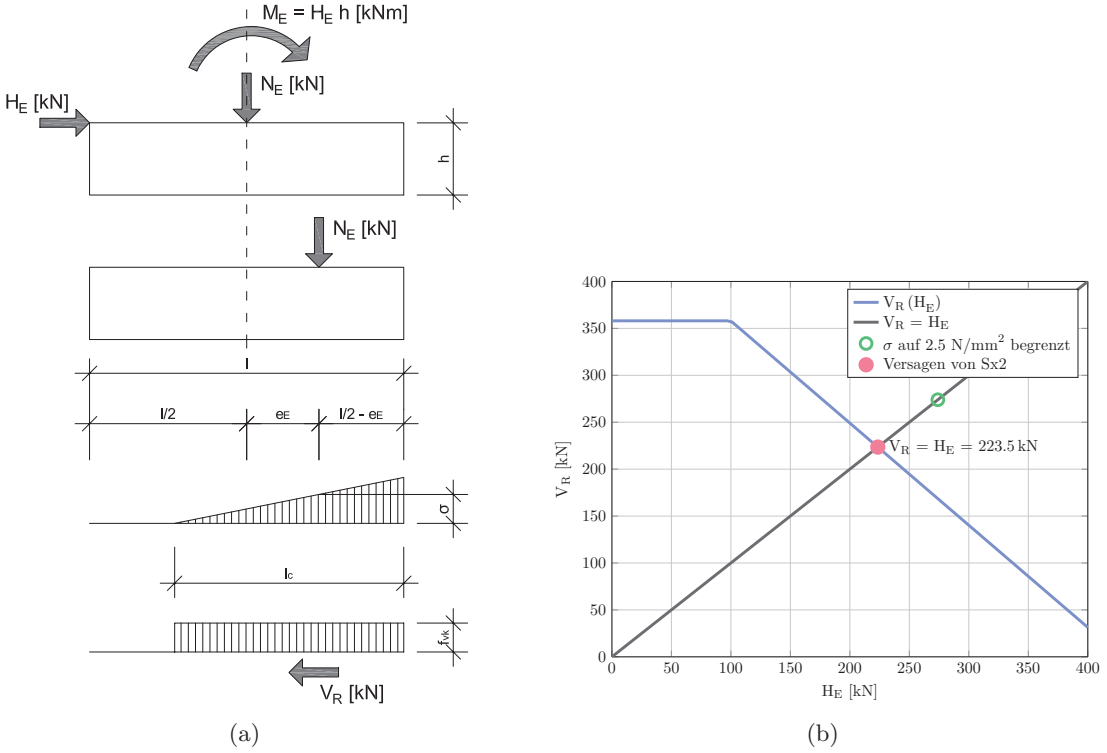



Abbildung 6.2: Graphische Darstellung der Vorgangsweise zur Bestimmung der zum Versagen führenden Horizontalkraft $H_E$: (a) Erläuterung der überdrückten Länge $l_c$, der charakteristischen Schubkraft $V_R$ und der einwirkenden Kräfte $H_E$, $N_E$ und $M_E$, sowie die zur Berechnung notwendigen Abstände (nach: Jäger, 2007; Wilhelm und Schustereder, 2010); (b) charakteristische Schubtragfähigkeit $V_R$ über der einwirkenden Horziontalkraft $H_E$ aufgetragen.

Durch Rückeinsetzen von $H_E$ in die Gleichungen 6.25 und 6.26 kann die überdrückte Mauerlänge $l_c$ zu

$$l_c = 3 \left( \frac{4.35}{2} - \frac{223.49 \cdot 2.55}{351.36} \right) = 1.659\,\text{m} < 4.35\,\text{m} \tag{6.30}$$

berechnet werden. Die Druckspannung $\sigma$ kann mit den Gleichungen 6.23 und 6.30 zu

$$\sigma = \frac{351.36}{0.25 \cdot 1.659} = 847.17\,\text{kN/m}^2 < 2500\,\text{kN/m}^2 \tag{6.31}$$

bestimmt werden. Der Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula wird mit der unter Abschnitt 6.1 ermittelten Kraft $X_2$ auf die Wandscheibe Sx2 von 29.17 kN zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$ von $1\,\text{kN/m}^2$ (vgl. dazu Abbildung 6.1 in Abschnitt 6.1) zu

$$p_{zuf.\,Schub} = \frac{V_R}{X_2 \cos\alpha}\, p_0 = \frac{223.49}{29.17 \cdot \cos 45} \cdot 1 = 10.84\,\text{kN/m}^2 \tag{6.32}$$

berechnet. Dieser neu berechnete Zerstörungsdruck $p_{zuf.\,Schub}$, unter Berücksichtigung der ÖNORM EN 1996-1-1 (2013), ist um ca. $8.5\,\text{kN/m}^2$ kleiner als der nach Tschom (2000) berechnete Zerstörungsdruck von $19.38\,\text{kN/m}^2$. Jedoch ist die Berechnung von Tschom (2000) mit dem von ihm verwendeten Sicherheitsfaktor bei der Bestimmung der Schubfestigkeit (vgl. Gleichung 5.24) nicht klar nachvollziehbar. Außerdem wird in dieser Rückrechnung die Länge des überdrückten Teils der Wand $l_c$ nicht berücksichtigt. Deshalb ist der Zerstörungsdruck nach Tschom (2000) nicht direkt mit dem nach ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) vergleichbar. Eine ähnliche Vorgangsweise nach der aktuellen Norm, jedoch ohne die Berücksichtigung von $l_c$, findet man in der Publikation von De Biagi et al. (2015).

KAPITEL 7

# Materialkennwerte

In den bisherigen Kapiteln wurde bei der Rückrechnung auf einen Zerstörungsdruck von bekannten Materialkennwerten ausgegangen. Die tatsächlichen Materialkennwerte von Ziegel, Mörtel und Mauerwerk (Verbund zwischen Ziegel und Mörtel), der diskutierten Wandscheibe Sx2 des Hauses Zangerl Paula, können jedoch nicht genau bestimmt werden. Das Kapitel 7 gibt einen Einblick in die Streubreite der verwendeten Materialkennwerte von Tschom (2000) und zeigt die Bestimmung von Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerten, über die einaxiale Zugfestigkeit und Druckfestigkeit.

## 7.1 Materialkennwerte aus der Literatur

Die Materialkennwerte für ein bestehendes Mauerwerk können mit Hilfe von Experten, Literatur oder durch einen Versuch abgeschätzt werden. Die diskutierte Wandscheibe Sx2 wurde im Winter 1999 vollständig zerstört und deshalb schätzte Helmuth Tschom zusammen mit einem Experten die Materialkennwerte ab.[1]

### 7.1.1 Mörteleigenschaften

Der Mörteltyp wurde von Tschom (2000) mit einem Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K festgelegt. Die Tabelle 7.1 fasst die Eigenschaften dieses Mörtels zusammen.

Tabelle 7.1: Eigenschaften eines Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K (nach: Tschom, 2000).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Mindestbiegezugfestigkeit | $f_{tb}$ | $N/mm^2$ | 0.5 |
| Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen | $f_c$ | $N/mm^2$ | 2.5 |

Für die Festlegungen von Mörtel im Mauerwerksbau ist die ÖNORM EN 998-2 (2010) die derzeit gültige Norm. Ein Kalk-Zement(KZ)-Mörtel II K entspricht nach ÖNORM EN 998-2 (2010) einem Mauermörtel M2.5. Dieser Mörtel weist eine Mindestdruckfestigkeit $f_c$ von $2.5\,N/mm^2$ auf. Nach Wesche (1981) schwankt die Druckfestigkeit $f_c$ eines vergleichbaren Mauermörtels zwischen 2.5 und $8\,N/mm^2$.

Tabelle 7.2: Charakteristische Biegezugfestigkeiten von Mauermörtel (nach: ÖNORM B 3341, 1995).

| Mauermörtelgruppe | M0 | M3 | M5 | M10 |
|---|---|---|---|---|
| char. Biegezugfest. $f_{tb}$ nach 28 Tagen in $(N/mm^2)$ | - | $\geq 1.0$ | $\geq 1.5$ | $\geq 2.5$ |

Zur Biegezugfestigkeit von Mauermörtel $f_{tb}$ sind in der aktuellen Norm keine Angaben zu finden. In der am 01.02.2002 zurückgezogenen ÖNORM B 3341 (1995) (ersetzt durch:

[1] Persönliches Interview mit Helmuth Tschom, geführt in Innsbruck am 20.05.2015.

ÖNORM EN 998-2 (2010)) wurden Angaben zur Biegezugfestigkeit von Mörtel gemacht, welche in der Tabelle 7.2 dargestellt sind. Betrachtet man das Schubversagen einer Wandscheibe, ist bei der Berechnung der charakteristischen Schubfestigkeit $f_{vk}$ von einem Mauerwerk (siehe Gleichung 6.22 in Abschnitt 6.2) vor allem die charakteristische Haftscherfestigkeit eines Mauerwerks $f_{vk0}$ von Bedeutung. Diese ist in Tabelle 7.3 für verschiedene Mauermörtelgruppen angegeben.

Tabelle 7.3: Charakteristische Haftscherfestigkeit eines Mauerwerks (aus: ÖNORM EN 1996-1-1, 2013).

| Mauermörtelgruppe | M10 - M20 | M2.5 - M9 | M1 - M2 |
|---|---|---|---|
| | [N/mm$^2$] | [N/mm$^2$] | [N/mm$^2$] |
| char. Haftscherfest. $f_{vk0}$ | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

Nach Tabelle 7.3 ergibt sich für einen Mauermörtel M2.5 ein $f_{vk0}$ von 0.2 N/mm$^2$, mit dem auch bereits in Abschnitt 6.2 der Zerstörungsdruck aufgrund eines Schubversagens der Mauerscheibe Sx2 des Hauses Zangerl Paula nach ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) rückgerechnet wurde. Die Haftscherfestigkeit $f_{v0}$ schwankt bei einem Hochlochziegel und einem vergleichbarem Mörtel zwischen 0.23 N/mm$^2$ und 0.47 N/mm$^2$ (Jäger, 2007). Der Wert 0.4 in der Gleichung für die charakteristische Schubfestigkeit $f_{vk}$ (siehe Gleichung 6.22 in Abschnitt 6.2), nach ÖNORM EN 1996-1-1 (2013), wird als Reibungsbeiwert $\mu$ interpretiert. Krapfenbauer und Sträussler (2004) gibt vergleichsweise einen Reibungsbeiwert $\mu$, für Mauerwerk auf Beton, von 0.76 an. Das bedeutet, dass die ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) sehr konservative Werte für $f_{vk0}$ und $\mu$ vorgibt.

Mit der Annahme, dass Mörtel ähnliche Eigenschaften wie ein unbewehrter Beton aufweist, eignet sich die Mohr - Coulomb'sche Versagenshypothese (siehe Abschnitt 7.2) zur Berechnung eines Schubversagens der Wandscheibe Sx2. Dies zeigt auch die Abbildung 7.1, in der die Versagenskurve von Beton aus Versuchen und die Grenzkurve des Mohr - Coulomb'schen Bruchkriterium eingetragen ist.

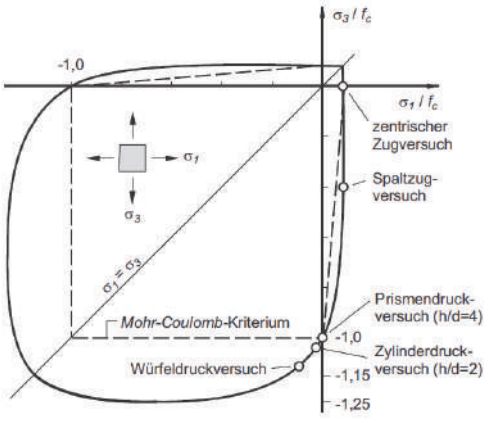



Abbildung 7.1: Festigkeit von Beton bei ebenem Spannungszustand ($\sigma_2 = 0$) (aus: Zilch und Zehetmaier, 2006).

Im folgenden Abschnitt 7.2 wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte gezeigt. Diese werden für eine Modellierung der Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente benötigt.

### 7.1.2 Ziegeleigenschaften

In der Betrachtung eines Schubversagens der Mauerscheibe Sx2 wird davon ausgegangen, dass die Schwachstelle im Mauerwerk der Verbund zwischen Ziegel und Mörtel ist. Diese Annahme schließt ein Steinzugversagen aus und somit sind die Materialkennwerte der Ziegel für diese Betrachtung weniger wichtig. In Tschom (2000) sind, bis auf die Wanddicke ($t = 0.25\,m$), keine Angaben zum verwendeten Ziegel in der Wandscheibe Sx2. Somit wäre die Angabe einer Festigkeit zum dort verwendeten Ziegel eine reine Schätzung. Nach Jäger (2007) können Hochlochziegel, je nach Wanddicke und Trockenrohdiche, eine Druckfestigkeit von 7.4 bis $47\,N/mm^2$ aufweisen.

## 7.2 Bestimmung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte $c$ und $\varphi$

Nach Mang und Hofstetter (2013) tritt bei der Mohr - Coulomb'schen Hypothese Werkstoffversagen ein, wenn einer der drei Mohr'schen Spannungskreise für den betreffenden räumlichen Spannungszustand die Umhüllende berührt. Dies ist auch in Abbildung 7.2 veranschaulicht. Für eine genaue Erläuterung dieser Versagenshypothese sei auf Mang und Hofstetter (2013) verwiesen. Über die Versagenshypothese nach Mohr - Coulomb (MC) können mit der einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ und Druckfestigkeit $f_c$ die Kohäsion $c$ und der Winkel der inneren Reibung des Materials $\varphi$ abgeschätzt werden. Als Coulomb'scher Reibungskoeffizient $\mu$ (kurz: Reibungsbeiwert) wird durch $\tan\varphi$ ausgedrückt. Die einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ wird aus der Biegezugfestigkeit $f_{tb}$ bestimmt (siehe Abschnitt 7.2.2).

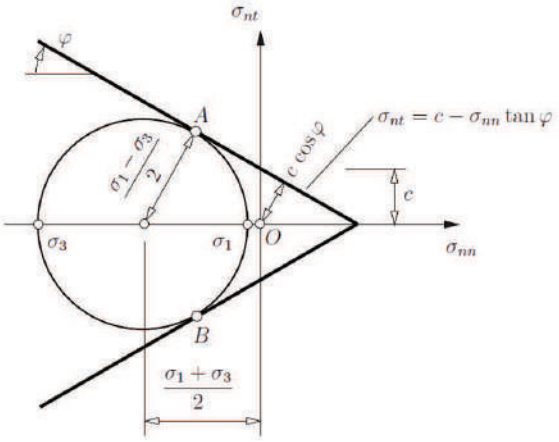



Abbildung 7.2: Skizze zweier Geraden als Umhüllende Mohr'scher Spannungskreise für kritische Spannungszustände, wobei $\sigma_{nn}$ eine Normalspannung und $\sigma_{nt}$ eine Schubspannung bezeichnet (aus: Mang und Hofstetter, 2013).

### 7.2.1 Herleitung der Gleichungen für die Bestimmung von $c$ und $\varphi$

In diesem Abschnitt wird die Herleitung der Gleichungen zur Bestimmung der Kohäsion $c$ und des Winkels der inneren Reibung des Materials $\varphi$ erläutert. Unter zu Hilfenahme der Abbildung 7.2 folgt der Zusammenhang zwischen den Hauptnormalspannungen $\sigma_1$ und $\sigma_3$ zu

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\sin\varphi = c\,\cos\varphi, \qquad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \tag{7.1}$$

bzw. mit $\sigma_1 = \sigma_{max}$ und $\sigma_3 = \sigma_{min}$ in alternativer Schreibweise zu

$$\sigma_{max} \frac{1 + \sin\varphi}{2\,c\,\cos\varphi} - \sigma_{min} \frac{1 - \sin\varphi}{2\,c\,\cos\varphi} = 1. \tag{7.2}$$

Nach Mang und Hofstetter (2013) kann man, in der Gleichung 7.2, für den einaxialen Zugversuch $\sigma_{max} = f_t$ (einaxiale Zugfestigkeit) und $\sigma_{min} = 0$ setzen und erhält:

$$f_t = \frac{2\,c\,\cos\varphi}{1 + \sin\varphi} \qquad [\mathrm{N/mm^2}]. \tag{7.3}$$

Setzt man für den einaxialen Druckversuch $\sigma_{max} = 0$ und $\sigma_{min} = -f_c$ (einaxiale Druckfestigkeit), so folgt:

$$f_c = \frac{2\,c\,\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \qquad [\mathrm{N/mm^2}]. \tag{7.4}$$

Mit einer bekannten einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ und Druckfestigkeit $f_c$ kann durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen 7.3 und 7.4 der Winkel der inneren Reibung des Materials $\varphi$ zu

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{\sigma_{min} - \sigma_{max}}\right) = \arcsin\left(\frac{-f_c + f_t}{-f_c - f_t}\right) \qquad [^\circ] \tag{7.5}$$

bestimmt werden. Der Reibungsbeiwert $\mu$ folgt dann zu:

$$\mu = \tan\varphi \qquad [\text{-}]. \tag{7.6}$$

Anschließend kann mit dem Ergebnis für $\varphi$ aus Gleichung 7.5 die Kohäsion $c$ aus Gleichung 7.3 wie folgt ermittelt werden:

$$c = \frac{f_t\,(1 + \sin\varphi)}{2\,\cos\varphi} \qquad [\mathrm{N/mm^2}]. \tag{7.7}$$

Im vorhergehenden Abschnitt 7.1 sind in Tabelle 7.1 die Materialkennwerte, des von Tschom (2000) verwendeten Mörtels, angeführt. Diese sind die Biegezugfestigkeit $f_{tb}$ und die Druckfestigkeit $f_c$ eines Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K. In den Gleichungen 7.5 und 7.7 wird von einer bekannten einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ und Druckfestigkeit $f_c$ ausgegangen. Somit muss für die Berechnung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte ($c$ und $\varphi$) der Wandscheibe Sx2 noch die einaxiale Zugfestigkeit des Mörtels $f_t$ bestimmt werden. Im Folgenden wird die Berechnung des Materialkennwertes $f_t$ gezeigt.

### 7.2.2 Bestimmung der einaxialen Zugfestigkeit $f_t$

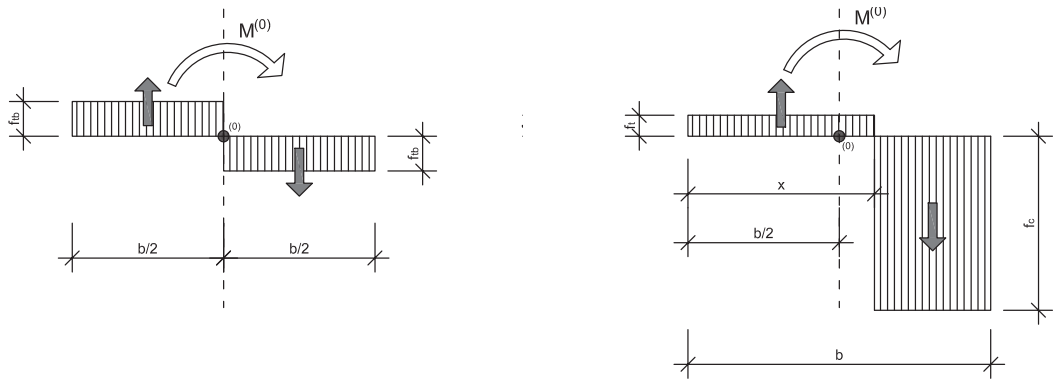
Zur Berechnung der einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ wird die Annahme eines vollständig plastifizierten Querschnitts getroffen. Die Abbildung 7.3 (a) zeigt eine mögliche Spannungsverteilung zur Bemessung eines Querschnitts auf Biegung. Bei dieser werden beide Randfasern des Querschnitts mit der Biegezugfestigkeit $f_{tb}$ beansprucht. Das Maximal aufnehmbare Moment $M_R$ würde sich zu

$$M_R = W_{pl}\, f_{tb} \tag{7.8}$$

mit

| | |
|---|---|
| $W_{pl}$ | plastisches Widerstandsmoment in [$\mathrm{m^3}$] |
| $f_{tb}$ | Biegezugfestigkeit in [$\mathrm{kN/m^2}$]. |

ergeben. Die Abbildung 7.3 (b) zeigt ebenfalls die Spannungsverteilung eines vollständig plastifizierten Querschnitts, jedoch mit den aus der Mohr - Coulomb'schen Versagenshypothese bestimmten einaxialen Zug- und Druckfestigkeit $f_t$ bzw. $f_c$. Die einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ ist in dieser Spannungsverteilung nicht bekannt. Mit der Annahme, dass das Moment um den Bezugspunkt (0) $M^{(0)}$ für beide Spannungsverteilungen gleich ist und die Summe der Vertikalen Kräfte $\sum V$ für beide Null, kann die unbekannte einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ bestimmt werden.




(a) (b)

Abbildung 7.3: Spannungsverteilungen eines vollständig plastifizierten Querschnitts mit der Breite b und einer reinen Biegebeanspruchung $M^{(0)}$, wobei in (a) die Randfasern bis maximal zur Biegezugfestigkeit $f_{tb}$ beansprucht werden und in (b) bis zur einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ bzw. Druckfestigkeit $f_c$.

Für die Spannungsverteilung in Abbildung 7.3 (a) ergibt sich:

$$\sum M^{(0)} = 0: \quad M^{(0)} = \left( f_{tb}\,\frac{b}{2}\,\frac{b}{4} \right) 2 = f_{tb}\,\frac{b^2}{4} \tag{7.9}$$

$$\sum V = 0: \quad f_{tb}\,\frac{b}{2} - f_{tb}\,\frac{b}{2} = 0. \tag{7.10}$$

Aus der Spannungsverteilung in Abbildung 7.3 (b) folgt:

$$\sum M^{(0)} = 0: \quad M^{(0)} = f_t\,x\,\left( \frac{b-x}{2} \right) + f_c\,(b-x)\,\left( \frac{b}{2} - \frac{b-x}{2} \right) \tag{7.11}$$

$$\sum V = 0: \quad f_t\,x - f_c\,(b-x) = 0. \tag{7.12}$$

Durch Gleichsetzten der Gleichungen 7.10 und 7.12 erhält man den Abstand $x$ zu:

$$x = \frac{f_c\,b}{f_c + f_t} \qquad [\mathrm{mm}]. \tag{7.13}$$

Die einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ wird durch Gleichsetzen der Gleichungen 7.9 und 7.11 und unter Berücksichtigung von Gleichung 7.13 wie folgt ermittelt:

$$f_t = \frac{f_c\,f_{tb}}{2\,f_c - f_{tb}} \qquad [\mathrm{N/mm^2}]. \tag{7.14}$$

### 7.2.3 Berechnung der Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte $c$ und $\varphi$ für die Mauerscheibe Sx2

Mit der in Abschnitt 7.2.2 bestimmten Gleichung 7.14 kann für den von Tschom (2000) bestimmten Mörtel (Kalk - Zement(KZ) - Mörtel II K) die einaxiale Zugfestigkeit $f_t$ wie folgt berechnet werden:

$$f_t = \frac{f_c\, f_{tb}}{2\, f_c - f_{tb}} = \frac{2.5 \cdot 0.5}{2 \cdot 2.5 - 0.5} = 0.278\,\mathrm{N/mm^2}. \tag{7.15}$$

Der berechnete Wert der einaxialen Zugfestigkeit des Mörtels $f_t$ wird mit einer einfachen Abschätzung nach Jäger (2007) überprüft:

$$f_t = 0.11\, f_c = 0.11 \cdot 2.5 = 0.275\,\mathrm{N/mm^2}. \tag{7.16}$$

Der berechnete Wert für $f_t$ von $0.278\,\mathrm{N/mm^2}$ wird somit für die weiteren Berechnungen verwendet. Die Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerte können mit den zuvor bestimmten Gleichungen 7.5 und 7.7 zu

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{-f_c + f_t}{-f_c - f_t}\right) = \arcsin\left(\frac{-2.5 + 0.278}{-2.5 - 0.278}\right) = 53.12\,^\circ \tag{7.17}$$

und

$$c = \frac{f_t\,(1 + \sin\varphi)}{2\,\cos\varphi} = \frac{0.278 \cdot (1 + \sin 53.12)}{2 \cdot \cos 53.12} = 0.4168\,\mathrm{N/mm^2} \tag{7.18}$$

berechnet werden. Damit ergibt sich der Reibungsbeiwert $\mu$ mit Gleichung 7.6 zu:

$$\mu = \tan\varphi = \tan 53.12 = 1.33. \tag{7.19}$$

Mit diesen berechneten Modellparametern der Mohr - Coulomb'schen Versagenshypothese wird in Kapitel 8 eine Modellierung der Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

### 7.2.4 Zusammenfassung

Die aus der Literatur und von Tschom (2000) ermittelten Materialkennwerten von Mörtel sind sogenannte Mindestfestigkeiten. Das sind jene Festigkeiten, welche vom Hersteller eingehalten werden müssen und von der Norm als Berechnungsgrundlage verwendet werden. In Jäger (2007) sind Streuungen, welche unter Abschnitt 7.1 angeführt wurden, zu verschieden Mörteltypen und Parametern dargestellt. Wird von einem Mörtel mit einer Druckfestigkeit $f_c$ von $2.5\,\mathrm{N/mm^2}$ ausgegangen, kann der tatsächlich eingebaute Mörtel eine um den Faktor 3 größere Druckfestigkeit aufweisen. Diese hat natürlich Auswirkungen auf den zu berechnenden Zerstörungsdruck. Fakt ist, man kennt die genauen Materialkennwerte des eingebauten Mörtels bzw. Mauerwerks nicht und kann diese auch nicht im Nachhinein ausreichend genau bestimmen.

Die von der ÖNORM EN 1996-1-1 (2013) vorgegebenen Kennwerte für die Haftscherfestigkeit des Mauerwerks $f_{vk0}$ und den interpretierten Reibungsbeiwert $\mu$ sind auf einer sehr konservativen Seite, was für eine Bemessung eines Bauteils (Mauerwerk) gut ist. Für die Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes eigenen sich diese Werte nicht, da man möglichst mit tatsächlich vorhandenen Materialkennwerten rechnen möchte.

Da Mörtel ähnliche Eigenschaften wie ein unbewehrter Beton aufweist, eignet sich die Versagenshypothese nach Mohr - Coulomb zur Berechnung eines Schubversagens der Wandscheibe Sx2. Die Werkstoffkennwerte der Mohr - Coulomb'schen Versagenshypothese $c$ und $\varphi$ können aus der einaxialen Zugfestigkeit $f_t$ und Druckfestigkeit $f_c$ des Mörtels berechnet werden. Diese werden für die Modellierung der Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente im Kapitel 8 verwendet.

KAPITEL 8

# Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente

Im Kapitel 8 wird die Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente modelliert, um verschiedene Lagerungsbedingungen der Deckenplatte zu berücksichtigen und ein besseres Verständnis für den Bruchmechanismus zu erhalten.[1] Die dazu verwendete Software für die Modellerstellung, Berechnung und Auswertung ist Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment).

## 8.1 Eingabe

Die Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) erfolgt linear elastisch - ideal plastisch. Die Wandscheibe Sx2 wird vereinfacht als homogener Körper mit einer Mohr - Coulomb'schen Versagenshypothese modelliert. Eine realistische Modellierung des Mauerwerksverbandes ist nur mit einem großen Aufwand möglich. Ein Beispiel für eine solch umfangreiche Untersuchung eines Mauerwerks ist in der Publikation von Furtmüller und Adam (2011) gegeben. Die verwendeten Materialkennwerte für den vereinfachten homogenen Körper sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Verwendete Materialparameter zur Modellierung der Wandschiebe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente.

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Elastizitätsmodul | $E$ | $\mathrm{N/mm^2}$ | 3988 |
| Querdehnzahl | $\nu$ | - | 0.2 |
| Reibungswinkel | $\varphi$ | ° | 53.12 |
| Kohäsion | $c$ | $\mathrm{N/mm^2}$ | 0.417 |
| Dilatanzwinkel | $\psi$ | ° | 53.12 |

Der in Tabelle 8.1 angeführte Elastizitätsmodul $E$ des Mörtels wird nach Jäger (2007) über die Druckfestigkeit $f_c$ wie folgt abgeschätzt:

$$E = 2100\, f_c^{0.7} = 2100 \cdot 2.5^{0.7} = 3988.20\,\mathrm{N/mm^2} \tag{8.1}$$

Die Querdehnzahl $\nu$ wird gleich wie in Furtmüller und Adam (2011) mit 0.2 angenommen. Die Werkstoffkennwerte für die Versagenshypothese nach Mohr - Coulomb ($\varphi$ und $c$) wurden bereits unter Abschnitt 7.2 berechnet und der Dilatanzwinkel $\psi$ wird gleich

[1] Die Modellierung der Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente erfolgte in Kooperation mit Matthias Rauter am 19.08.2015.

dem Winkel der inneren Reibung des Materials $\varphi$ angenommen. In Abschnitt 8.2 ist eine Variation von $\psi$ in der Abbildung 8.7 dargestellt und die Annahme $\psi = \varphi$ begründet.

Die Wandscheibe wird dreidimensional, mit den Abmessungen 4.35 x 0.25 x 2.55 m (vgl. Abbildung 8.2), in Abaqus/CAE eingegeben. Anschließend wird die Wand mit dem Elementtyp „Wedge“ und der Technik „Sweep“ vernetzt. In Abbildung 8.1 ist die Vernetzung der Wandscheibe Sx2 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass mit einem Element über die Dicke gerechnet wird und somit mit einem ebenen Spannungszustand.

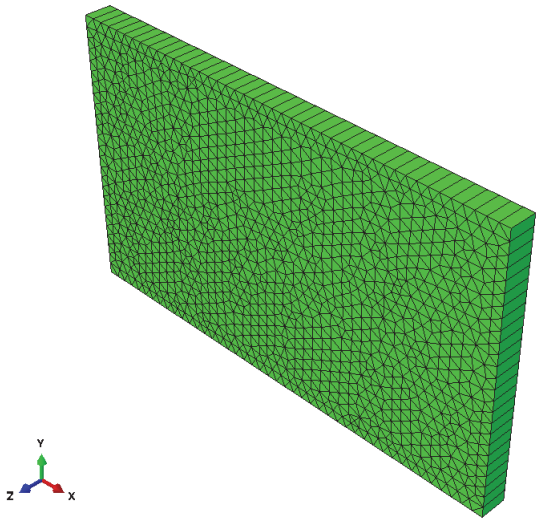



Abbildung 8.1: 3D - Darstellung der Vernetzung der Wandscheibe Sx2.

Bei der Eingabe der Randbedingungen werden zwei Varianten untersucht:

1. Variante:
   - Unendlich steife Platte auf dem Wandkopf: Diese kann sich heben und senken, aber nicht verdrehen. In Abaqus wird die unendlich steife Platte näherungsweise mit dem Befehl „Edit Constrain“ eingegeben. Mit diesem Befehl werden alle Knoten am Kopf der Wand zu einem Starrkörper zusammengehängt. Daher sind alle Verschiebungen $u_1$ am Wandkopf identisch.
   - Randbedingungen am Wandfuß nach Abbildung 8.2
2. Variante:
   - freier Rand auf dem Wandkopf
   - Randbedingungen am Wandfuß nach Abbildung 8.2

Bei beiden Varianten wird in einem ersten Schritt eine Flächenlast von $0.32\,\mathrm{N/mm^2}$ aufgebracht, welche unter Abschnitt 5.2 bereits ermittelt wurde. Weiters wird der Wandkopf mit einer Verschiebung in x - Richtung $u_1$ bis zum Versagenszustand belastet.

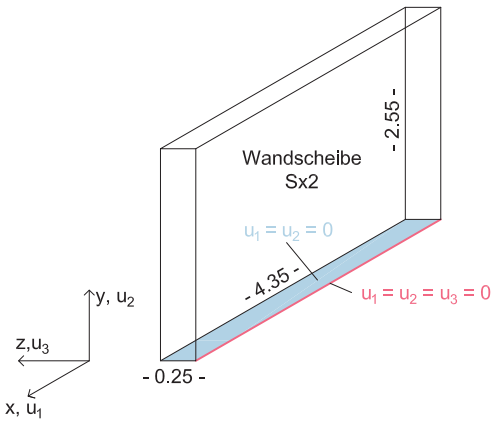



Abbildung 8.2: Definition der Randbedingungen am Wandfuß der Wandscheibe Sx2.

## 8.2 Ergebnisse

Das Ergebnis der maximalen plastischen Verzerrungen für die Variante 1 ist in der Abbildung 8.3 dargestellt. In dieser Illustration ist ein diagonaler Riss durch die Wandscheibe zu erkennen. Dies steht im Gegensatz zu Variante 2 in Abbildung 8.4, bei der die maximalen plastischen Verzerrungen an der rechten unteren Ecke auftreten.

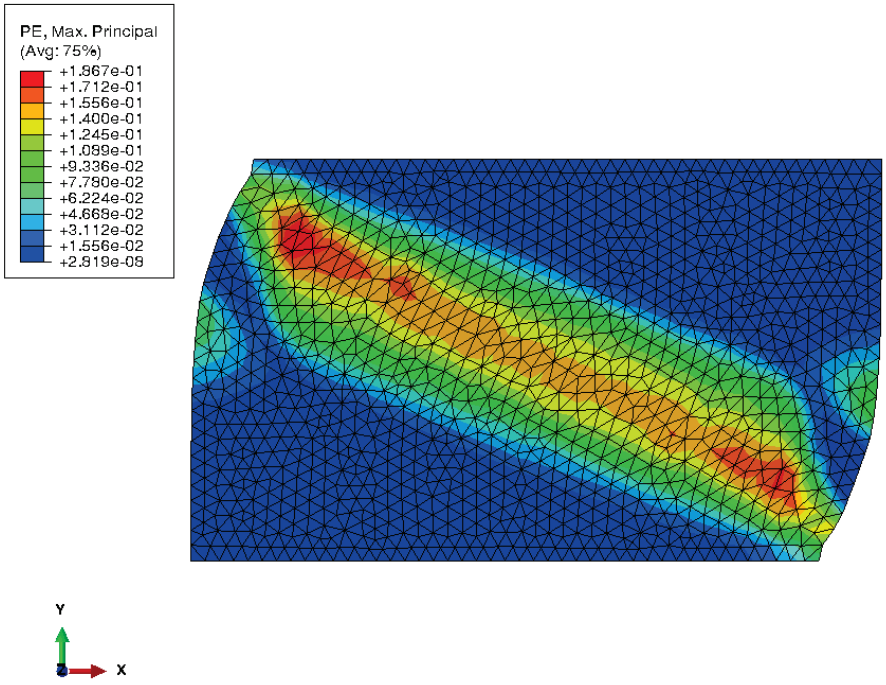



Abbildung 8.3: Maximale plastische Verzerrungen in [N/mm$^2$] der Variante 1 - unendlich steife Platte am Wandkopf.

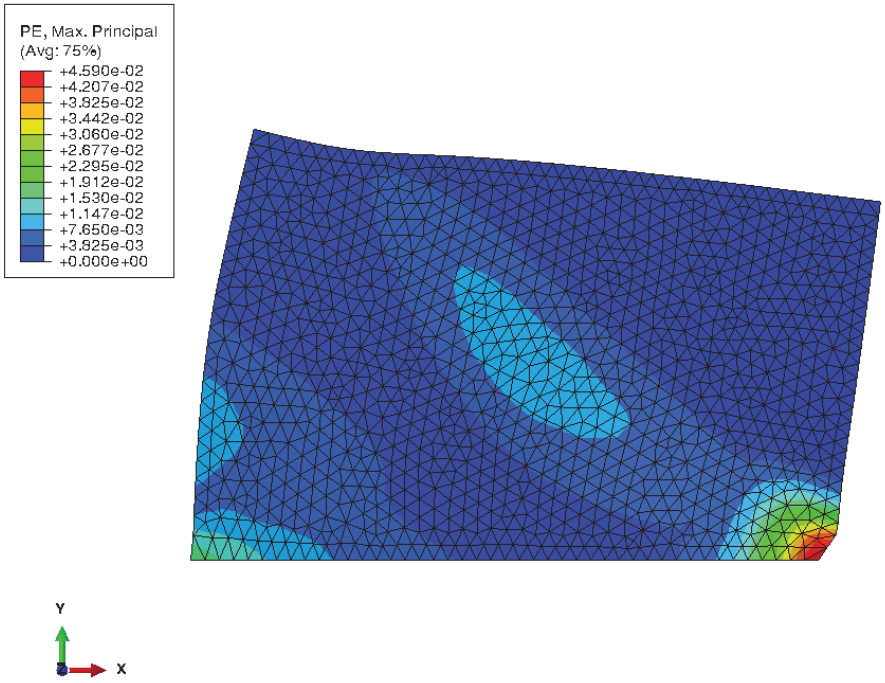



Abbildung 8.4: Maximale plastische Verzerrungen in [N/mm$^2$] der Variante 2 - freier Rand am Wandkopf.

Die einwirkende Horizontalkraft am Wandkopf $H_E$ und die dazugehörige Verschiebung $u_1$ wird aus der Ergebnisdatei von Abaqus/CAE für beide Variante ausgelesen und in einem Diagramm in Abbildung 8.6 aufgetragen. Zum Vergleich ist in diesem Diagramm auch die nach Norm (siehe Abschnitt 6.2) zum Versagen führende Kraft $H_E$ eingetragen. Zusätzlich dazu wird mit den ermittelten Mohr - Coulomb'schen Werkstoffkennwerten des Mörtels, aus Abschnitt 7.2, die zum Versagen führende Horizontalkraft am Wandkopf $H_E$ mittels einer Untersuchung eines Starrkörper - Bruchmechanismus graphisch bestimmt. Mit Hilfe dieser Methode wird die FEM - Berechnung kontrolliert. Aus dem Ergebnis in Abbildung 8.3 wird der untersuchte Bruchmechanismus abgeleitet und mittels Kraftdreiecks graphisch ausgewertet (siehe Abbildung 8.5).

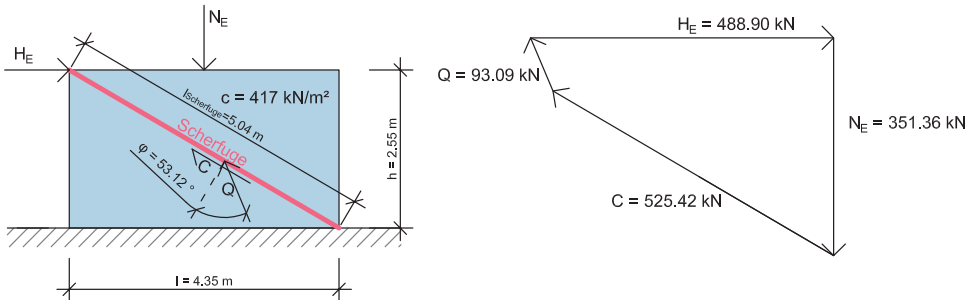



Abbildung 8.5: Untersuchter Starrkörper - Bruchmechanismus mit graphischer Auswertung der zum Versagen führenden Horizontalkraft am Wandkopf $H_E$.

In ausreichender Genauigkeit wird für diese Abschätzung dieselbe vertikale Kraft $N_E$ von 351.36 kN, welche bereits in Abschnitt 6.2 ermittelt wurde, verwendet. Die im Kraftdreieck eingetragene Kohäsionskraft $C$ wird zu

$$C = c\,t\,l_{Scherfuge} = 417 \cdot 5.04 \cdot 0.25 = 525.42\,\text{kN} \tag{8.2}$$

berechnet und die Reibungskraft $Q$ wird graphisch zu 93.09 kN ermittelt. Mit dem Kraftdreieck in Abbildung 8.5 wird die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$ graphisch zu 488.90 kN bestimmt.

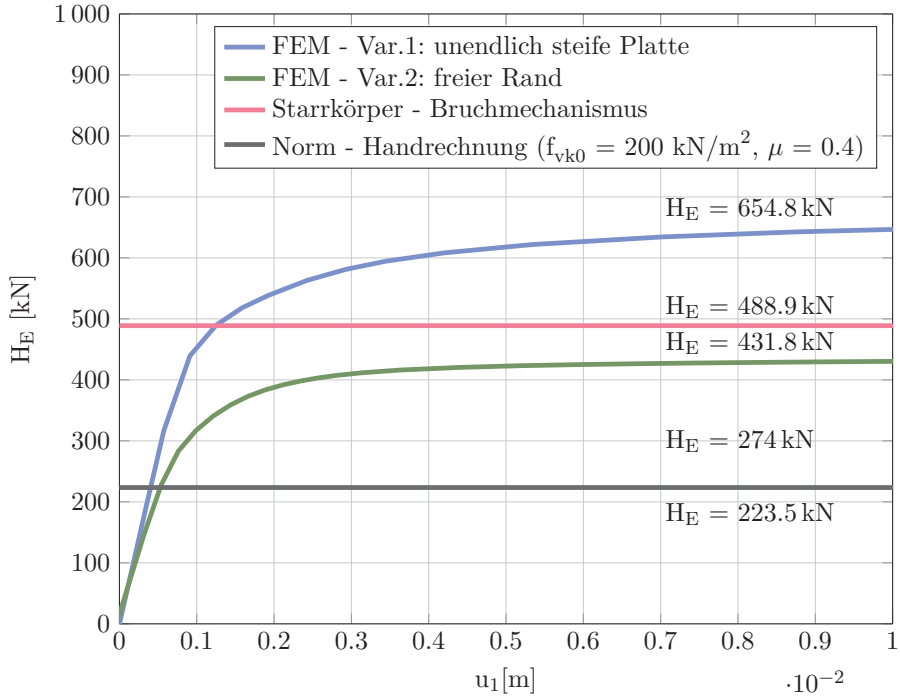



Abbildung 8.6: Ergebnisse für die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$.

Mit den Ergebnissen für die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$ wird in Abschnitt 8.3 auf den Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula rückgerechnet.

In Abbildung 8.7 wird der Einfluss des Dilatanzwinkels $\psi$ auf die FEM - Berechnung der Wandscheibe Sx2 überprüft. Es wird festgestellt, dass sich das Ergebnis bei Variation des Dilatanzwinkels $\psi$ für die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$ nicht bedeutend ändert und bei der Annahme $\psi = \varphi$ die FEM - Berechnung numerisch am stabilsten abläuft.

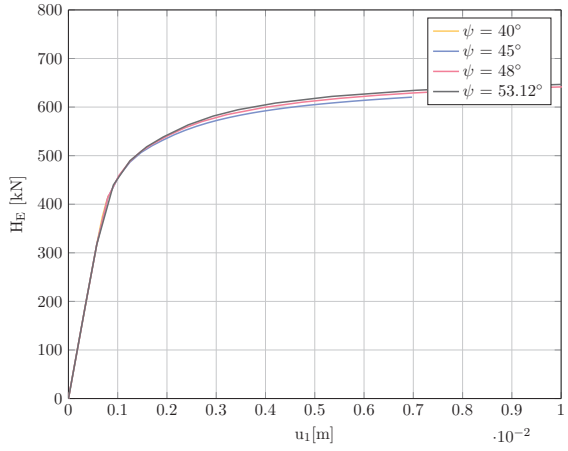



Abbildung 8.7: Einwirkende Horizontalkraft $H_E$ (Variante 1) über der Verschiebung $u_1$, bei Variation des Dilatanzwinkels $\psi$, aufgetragen.

## 8.3 Rückrechnung auf den Zerstörungsdruck

Mit den Ergebnissen für die zum Versagen führenden Horizontalkräfte $H_E$ aus Abbildung 8.6 kann auf Zerstörungsdrücke $p_{zuf.\,Schub}$ auf das Eck Haus Zangerl Paula (Anprallwinkel $\alpha = 45°$) rückgerechnet werden. Natürlich ist diese Rückrechnung mit denselben Unsicherheiten, welche in Abschnitt 5.2.5 erläutert werden, behaftet. Wie in Abschnitt 6.2 wird die Kraft $X_2$ auf die Wandscheibe Sx2 mit 29.17 kN, zufolge der statischen Ersatzlast $p_0$ von 1 kN/m$^2$, angesetzt. Die Zerstörungsdrücke $p_{zuf.\,Schub}$ in Tabelle 8.2 werden mit der Gleichung

$$p_{zuf.\,Schub} = \frac{H_E}{X_2 \cos\alpha}\, p_0 \qquad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{8.3}$$

ermittelt.

Tabelle 8.2: Zerstörungsdrücke $p_{zuf.\,Schub}$ auf das Eck Haus Zangerl Paula mit unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der zum Versagen führenden Horizontalkraft $H_E$.

| Methode zur Berechnung von $H_E$ | $H_E$ [kN] | $p_{zuf.\,Schub}$ [kN/m$^2$] |
|---|---|---|
| FEM - Var.1: unendlich steife Platte | 654.80 | 31.75 |
| Starrkörper - Bruchmechanismus | 488.90 | 23.70 |
| FEM - Var.2: freier Rand | 431.80 | 20.93 |
| Norm - Handrechnung | 223.50 | 10.84 |

Aus der Tabelle 8.2 ist zu erkennen, dass die Norm - Handrechnung den Zerstörungsdruck auf das Eck Haus Zangerl Paula unterschätzt und somit für eine Rückrechnung meist nicht geeignet ist. Außerdem kann man aus den beiden unterschiedlichen Varianten der FEM - Berechnung den Einfluss der Lagerungsbedinungen der Wandscheibe Sx2 auf den Zerstörungsdruck feststellen.

## 8.4 Zusammenfassung

Bei dieser Modellierung der Wandscheibe Sx2 mit der Methode der Finiten Elemente ist der Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes der Lawine zu erkennen. Mit der Annahme einer unendlich steifen Platte ist die zum Versagen führende Horizontalkraft $H_E$ um einen Faktor 1.5 höher als bei der Annahme eines freien Randes des Wandkopfes.

Weiters wird festgestellt, dass die Norm - Handrechnung eine um die Hälfte kleinere Versagenskraft $H_E$ liefert. Die Norm - Handrechnung unterschätzt den Zerstörungsdruck und ist somit für eine Rückrechnung meist nicht geeignet.

KAPITEL 9

# Rückrechnung auf den dynamischen Spitzendruck

Das Kapitel 9 beschreibt die Fließlawinensimulation der Wasserleiterlawine in Galtür mit dem Lawinensimulationsprogramm SamosAT (Snow Avalanche MOdeling and Simulation – Advanced Technology) (Sampl, 2007; Oberndorfer und Granig, 2007). Die Auswertung der Simulation beschränkt sich auf die dynamischen Spitzendrücke (maximaler Druck über die Zeit), da das Schadenspotential einer Lawine meist in Abhängigkeit des Lawinendruckes angegeben wird. Diese Masterarbeit setzt sich speziell mit dem Schaden am Haus Zangerl Paula auseinander und deshalb werden die dynamischen Spitzendrücke in diesem Bereich genauer betrachtet. Zur Veranschaulichung der Streubreite der Ergebnisse werden vier unterschiedliche Varianten zur Simulation der genannten Lawine vorgestellt.

## 9.1 Beschreibung der Wasserleiterlawine

Am 23. Februar 1999 wurden durch ein katastrophales Lawinenereignis in der Gemeinde Galtür viele Häuser komplett zerstört und 31 Menschen getötet. Nach Sauermoser et al. (2004) überwand die Wasserleiterlawine bei diesem Ereignis eine Fallhöhe von rund 1100 m. Es wurden insgesamt vier Anbruchgebiete, mit einer Gesamtanbruchfläche von rund 17.21 ha, dokumentiert (siehe dazu Abbildung 9.2). Die von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) bisher verwendete Schneemächtigkeit zur Simulation der Wasserleiterlawine beträgt 2.11 m (Kofler und Fischer, 2015). Somit ergibt sich das Anbruchvolumen laut SamosAT zu rund 360000 $m^3$. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 9.1 zwei Fotos vom 3.Juli 2015 des Geländes der Wasserleiterlawine dargestellt.

(a) (b)

Abbildung 9.1: Fotos des Geländes der Wasserleiterlawine: (a) Blick von Galtür in das Anbruchgebiet der Wasserleiterlawine; (b) Blick vom Anbruchgebiet der Wasserleiterlawine nach Galtür (03.07.15).

## 9.2 Beschreibung und Ergebnisse der Simulationen

Bei einer Lawinensimulation mit der Software SamosAT werden die Modellgleichungen (Massenerhaltungs- und Impulserhaltungsgleichungen) einer Lawine für die Zustandsgrößen Fließmächtigkeit $\bar{h}$ und Fließgeschwindigkeit $\bar{u}$ gelöst. Für ausführliche Erläuterungen dazu, sei auf Sampl (2007) und Oberndorfer und Granig (2007) verwiesen. Aus der Geschwindigkeit $\bar{u}$ und der Dichte $\bar{\rho}$ wird ein dynamischer Spitzendruck ermittelt.

Es werden insgesamt vier Fließlawinensimulationen mit unterschiedlichen Reibungsmodellen und verschiedenen Eingangsparametern durchgeführt. Im Allgemeinen wird bei der Lawinensimulation kein Entrainment (Schneeaufnahme) berücksichtigt. In neuen Studien nach Granig et al. (2013) und Kofler und Fischer (2015) werden Lawinensimulationen mit Entrainment behandelt. Deshalb wird in der Lawinensimulation im Unterabschnitt 9.2.4 Entrainment berücksichtigt. Das Gesamtanbruchgebiet mit 17.21 ha bleibt jedoch bei allen vier Simulationen konstant. Die Eingabe der Anbruchflächen und Entrainmentfläche ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

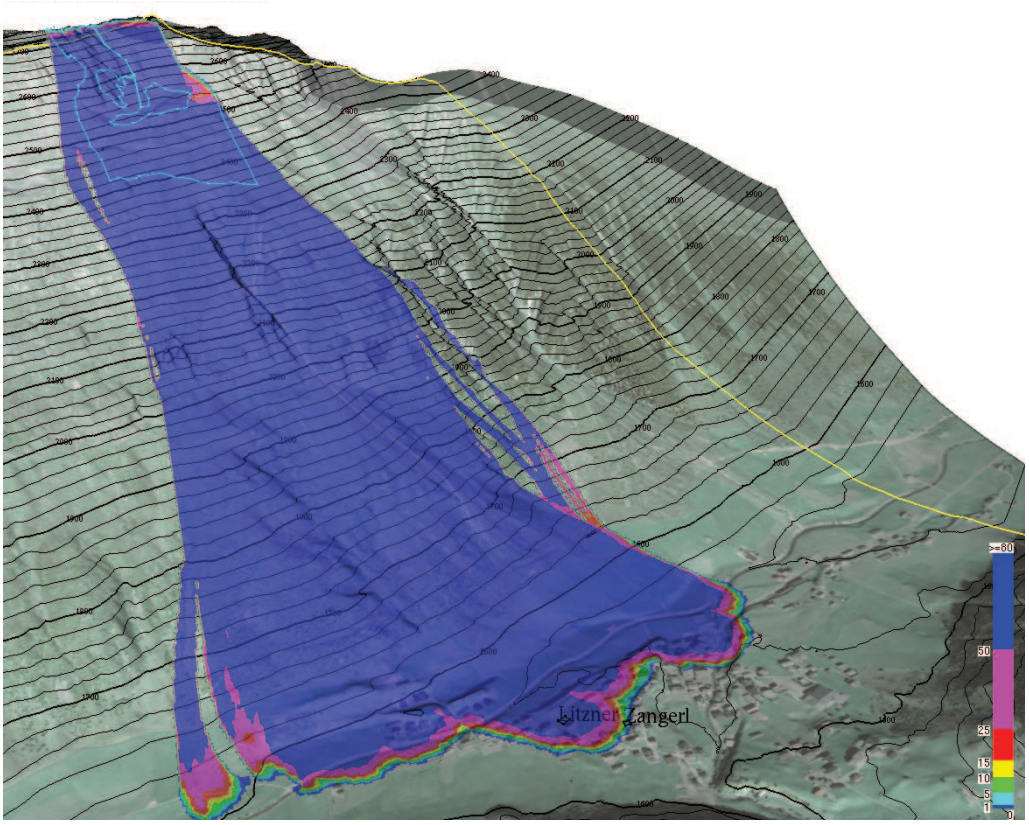



Abbildung 9.2: Eingaben in SamosAT: Anbruchgebiete (türkis dargestellt), Entrainmentfläche (gelb dargestellt) und ein exemplarisches Ergebnis einer Simulation für die dynamischen Spitzendrücke in [kPa].

Reibungsmodelle beschreiben die Bodenschubspannung $\tau^{(b)}$ als Funktion des Strömungszustandes des fließenden Materials, welches in diesem Fall Schnee ist (Fischer und Kofler, 2013). Die unterschiedlichen Reibungsmodelle, die bei den Simulationen verwendet werden, sind das Reibungsmodell SamosAT nach Sampl (2007)

$$\tau^{(b)} = \tau_0 + \tan\delta\,(1 + \frac{R_s^0}{R_s^0 + R_s})\,\sigma^{(b)} + \frac{\bar{\rho}\,\bar{u}^2}{(\frac{1}{\kappa}\,\ln\frac{\bar{h}}{R} + B)^2} \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{9.1}$$

mit

| | |
|---|---|
| $\tau^{(b)}$ | Bodenschubspannung in [N/m$^2$] |
| $\tau_0$ | Mindestschubspannung in [N/m$^2$] |
| $\mu = \tan\delta$ | Reibungskoeffizient in [-], wobei $\delta$ dem Bettreibungswinkel in [°] entspricht |
| $R_s^0$ | Bettreibungsüberhöhung mit abnehmender Geschwindigkeit in [-] |
| $R_s$ | Verhältnis zwischen turbulenten Kräften und Normaldruck durch die Lawinenlast am Boden, $R_s = \frac{\bar{\rho}\,\bar{u}^2}{\sigma^{(b)}}$ in [-] |
| $\sigma^{(b)}$ | Normalspannung (Druck) am Boden in [N/m$^2$] |
| $\bar{\rho}$ | mittlere Fließdichte in [kg/m$^3$] |
| $\bar{u}$ | Fließgeschwindigkeit in [m/s] |
| $\kappa$ | Pseudo - Karman - Konstante in [-] |
| $\bar{h}$ | mittlere Fließmächtigkeit in [m] |
| $R$ | Bettrauhigkeit in [m] |
| $B$ | empirisch zu bestimmende Konstante in [-] |

und das Reibungsmodell Voellmy (1955) in der Schreibweise laut Sampl (2007)

$$\tau^{(b)} = \tan\delta\,\sigma^{(b)} + c_{dyn}\,\bar{\rho}\,\bar{u}^2 = \mu\,\sigma^{(b)} + \frac{g\,\bar{\rho}\,\bar{u}^2}{\xi} \qquad [\mathrm{N/m^2}] \tag{9.2}$$

mit

| | |
|---|---|
| $\tau^{(b)}$ | Bodenschubspannung in [N/m$^2$] |
| $\mu = \tan\delta$ | Reibungskoeffizient in [-], wobei $\delta$ dem Bettreibungswinkel in [°] entspricht |
| $\sigma^{(b)}$ | Normalspannung (Druck) am Boden in [N/m$^2$] |
| $c_{dyn}$ | dynamische Reibungskonstante (Proportionalitätsfaktor) in [-] |
| $\bar{\rho}$ | mittlere Dichte in [kg/m$^3$] |
| $\bar{u}$ | Fließgeschwindigkeit in [m/s] |
| $g$ | Erdbeschleunigung: 9.81 m/s$^2$ |
| $\xi = \frac{g}{c_{dyn}}$ | Turbulenzkoeffizient in [m/s$^2$]. |

Für eine ausführliche Beschreibung der genannten Reibungsmodelle sei auf Sampl (2007) verwiesen. Die Eingabe der numerischen Parameter zur Berechnung der dynamischen Spitzendrücke erfolgt bei allen vier Simulation nach Tabelle 9.1 (vgl.: Granig et al., 2013; Oberndorfer und Granig, 2007).

Tabelle 9.1: Numerische Parameter für die Durchführung der Simulationen.

| Bezeichnung | Einheit | Wert |
|---|---|---|
| End-Zeit | s | 400 |
| Zeitschritt | s | 0.1 |
| Fließmächtigkeit pro Partikel | m | 0.5 |

Die folgenden Unterabschnitte 9.2.1 bis 9.2.4 beschreiben die verwendeten Eingabeparameter und die Ergebnisse der jeweiligen Simulationen.

### 9.2.1 Simulation 01 - „Klassisch - SamosAT nach Sampl (2007)“

Bei der ersten Simulation wird das Reibungsmodell SamosAT mit den Standardparametern nach Sampl (2007) gewählt. Die Parameter für das Reibungsmodell SamosAT sind in der Tabelle 9.2 aufgelistet. Die im Anbruchgebiet gemittelte Schneemächtigkeit $\bar{h}$ wird, wie nach Expertenwissen der WLV, mit 2.11 m angenommen (Kofler und Fischer, 2015). Weiters werden die Anbruchdichte $\rho_{rel}$ mit 150 kg/m$^3$ und die Fließdichte $\bar{\rho}$ mit 200 kg/m$^3$ gewählt.

Tabelle 9.2: Standardparameter des Reibungsmodells SamosAT und weitere Annahmen für die Prozessparamter der Fließlawine (nach: Sampl, 2007; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Mindestschubspannung | $\tau_0$ | N/m$^2$ | 0 |
| Reibungskoeffizient | $\mu = \tan\delta$ | - | 0.155 |
| Bettreibungsüberhöhung | $R_s^0$ | - | 0.222 |
| Pseudo - Karman - Konstante | $\kappa$ | - | 0.43 |
| Bettrauhigkeit | $R$ | m | 0.1 |
| empirisch zu bestimmende Konstante | $B$ | - | 4.13 |
| gemittelte Schneemächtigkeit | $\bar{h}$ | m | 2.11 |
| Anbruchdichte | $\rho_{rel}$ | kg/m$^3$ | 150 |
| Fließdichte | $\bar{\rho}$ | kg/m$^3$ | 200 |

Somit kann die Simulation mit den angeführten Modellparametern durchgeführt und die dynamischen Spitzendrücke angezeigt werden. Ein Ausschnitt des Ergebnisses der dynamischen Spitzendrücke der Simulation 01 ist in Abbildung 9.3 dargestellt. In diesem Ausschnitt ist das Haus Zangerl und das Haus Litzner abgebildet. Zusätzlich ist noch der dokumentierte Ablagerungsbereich in schwarz eingetragen. Bei dieser Simulation wird das Haus Litzner und Zangerl nicht annähernd erreicht. Die Lawine stoppt überwiegend vor dem in Abbildung 9.3 sichtbaren Bachbett.

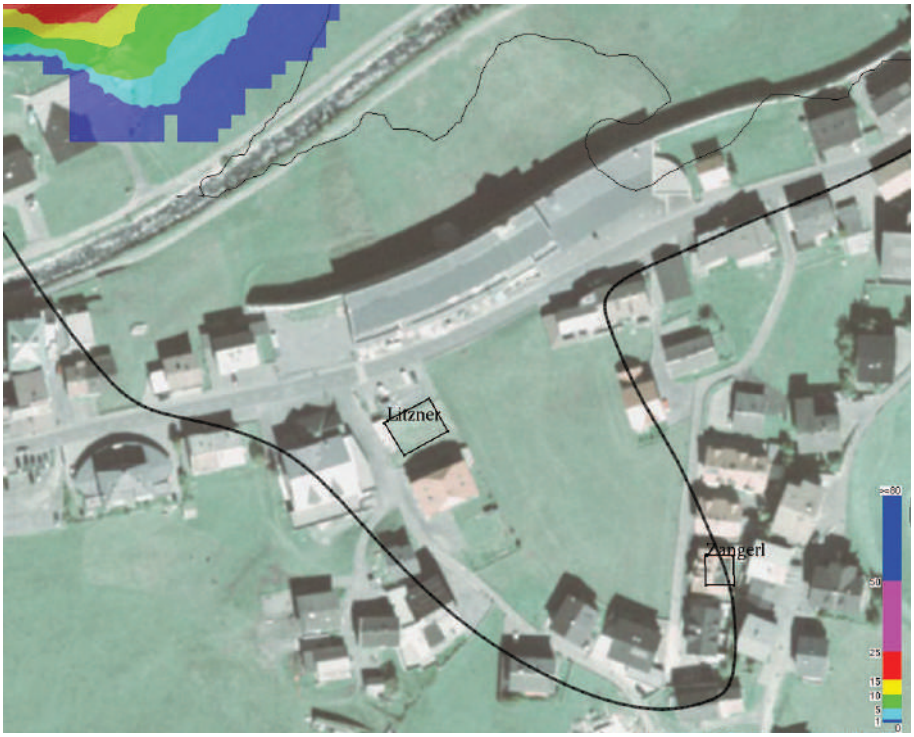



Abbildung 9.3: Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Klassisch - SamosAT nach Sampl (2007)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015).

### 9.2.2 Simulation 02 - „Voellmy - SamosAT nach Sampl (2007)“

Bei der zweiten Simulation wird das Reibungsmodell Voellmy mit den Standardparametern von SamosAT gewählt. Die Parameter für das Reibungsmodell Voellmy sind in der Tabelle 9.3 dargestellt. Alle weiteren Annahmen zur Simulation der Lawine, wie die Anbruchdichte, Fließdichte und Schneemächtigkeit, werden gleich wie bei der „Klassisch - SamosAT nach Sampl (2007)“ Simulation gewählt. Zusammengefasst sind diese Parameter nochmal in der Tabelle 9.3 dargestellt.

Tabelle 9.3: Standard Parameter von SamosAT für das Reibungsmodell Voellmy und weitere Annahmen für die Prozessparameter der Fließlawine (nach: Sampl, 2007; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Reibungskoeffizient | $\mu = \tan\delta$ | - | 0.155 |
| Turbulenzkoeffizient | $\xi$ | $m/s^2$ | 4000 |
| gemittelte Schneemächtigkeit | $\bar{h}$ | m | 2.11 |
| Anbruchdichte | $\rho_{rel}$ | $kg/m^3$ | 150 |
| Fließdichte | $\bar{\rho}$ | $kg/m^3$ | 200 |

Mit den in der Tabelle 9.3 angegebenen Annahmen erhält man das in Abbildung 9.4 dargestellte Ergebnis für die dynamischen Spitzendrücke. Bei dieser Simulation trifft die

Lawine auf die beiden abgebildeten Häuser und erreicht beim Haus Litzner einen dynamischen Spitzendruck > 50 kPa und beim Haus Zangerl 15 bis 25 kPa.

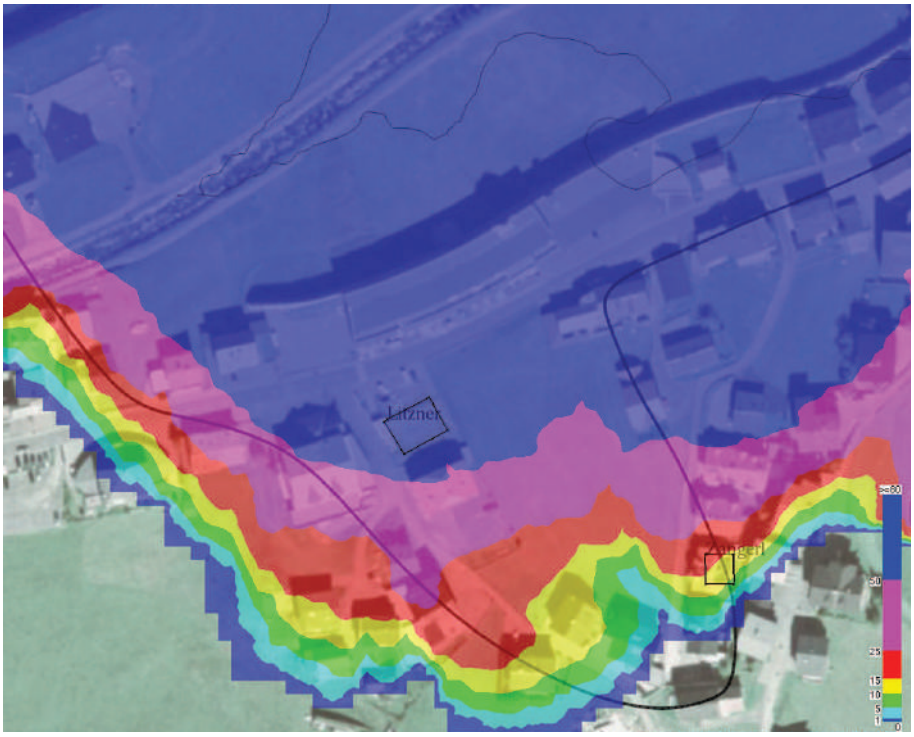



Abbildung 9.4: Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Voellmy - SamosAT nach Sampl (2007)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015).

### 9.2.3 Simulation 03 - „Voellmy - nach Gruber et al. (1999)“

Bei der dritten Simulation wird das Reibungsmodell Voellmy mit den in Gruber et al. (1999) dafür geeigneten Parametern gewählt. Die Parameter für dieses Reibungsmodell und die für diese Simulation verwendeten Prozessparameter sind in der Tabelle 9.4 dargestellt.

Tabelle 9.4: Parameter für das Reibungsmodell Voellmy und weitere Annahmen für die Prozessparamter der Fließlawine (nach: Gruber et al., 1999; Jörg und Granig, 2010; Kofler und Fischer, 2015).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Reibungskoeffizient | $\mu = \tan\delta$ | - | 0.155 |
| Turbulenzkoeffizient | $\xi$ | $m/s^2$ | 1000 |
| gemittelte Schneemächtigkeit | $\bar{h}$ | m | 2.11 |
| Anbruchdichte | $\rho_{rel}$ | $kg/m^3$ | 150 |
| Fließdichte | $\bar{\rho}$ | $kg/m^3$ | 200 |

Mit den in Tabelle 9.4 angegebenen Annahmen erhält man das in Abbildung 9.5 dargestellte Ergebnis für die dynamischen Spitzendrücke. Wie bei der Simulation in Abschnitt 9.2.1

erreicht die Lawine die beiden betrachteten Häuser nicht und somit kann keine Aussage über den dynamischen Spitzendruck an diesen Stellen gemacht werden.

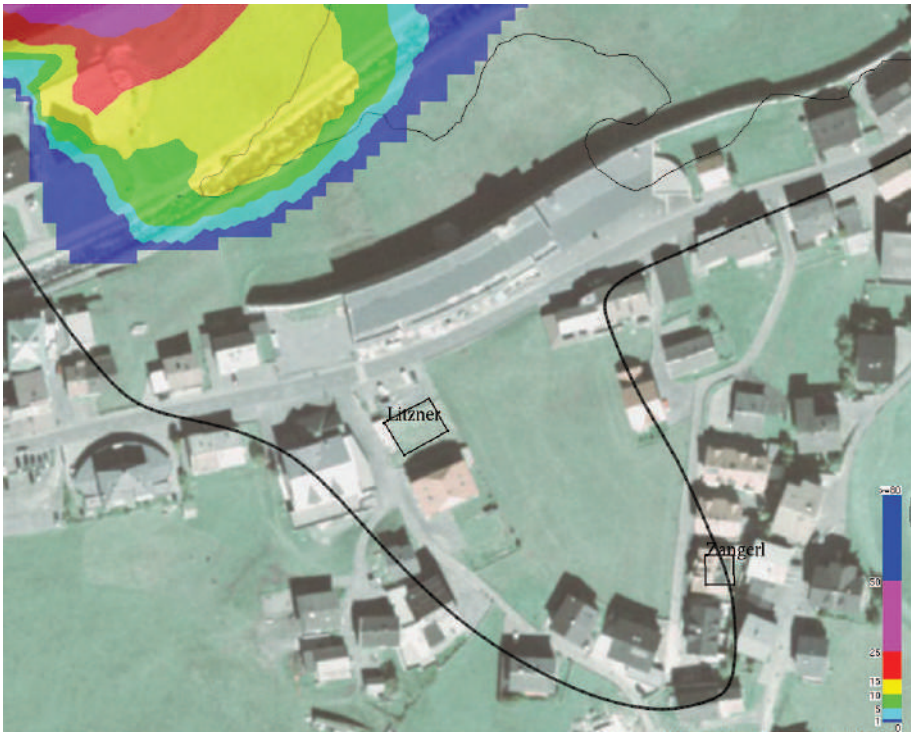



Abbildung 9.5: Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „Voellmy - nach Gruber et al. (1999)“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015).

### 9.2.4 Simulation 04 - „CoSiCa II - Standard“

Bei der vierten und damit letzten Simulation wird das Reibungsmodell Voellmy mit den Parametern nach Kofler und Fischer (2015) gewählt. Bei dieser Simulation wird Entrainment berücksichtigt. Zusätzlich dazu wird keine mittlere Schneemächtigkeit angesetzt, sondern über das MSC (mountain snow cover) - Konzept nach Fischer und Kofler (2013) eine Schneeverteilung abgeschätzt. Das MSC - Konzept stellt eine Möglichkeit dar, die Variabilität der Schneemächtigkeit über die Seehöhe und Hangneigung darzustellen. Nach Fischer und Kofler (2013) wird die Verteilung der Schneemächtigkeit $d_{msc}(x, y, z(x, y))$ wie folgt formuliert:

$$d_{msc}(x, y, z(x, y)) = (d_0(z_{ref}) + (z(x, y) - z_{ref})\,\Delta d))\,\cos\theta \qquad [\text{m}] \tag{9.3}$$

mit

| | |
|---|---|
| $z_{ref}$ | Referenzseehöhe in [m] |
| $d_0(z_{ref})$ | Schneemächtigkeit bei der Referenzseehöhe in [m] |
| $\Delta d$ | Gradient der Schneemächtigkeit mit Seehöhe in [cm/100 m] |
| $z(x, y)$ | jeweiliger Wert des digitalen Höhenmodells (DHM) in [m] |
| $\theta$ | Korrekturfaktor der Hangneigung in [°]. |

Die Tabelle 9.5 fasst alle Eingaben für diese Simulation zusammen.

Tabelle 9.5: Parameter für das Reibungsmodell Voellmy mit Entrainment, Parameter zur Bestimmung der Schneeverteilung und weitere Annahmen für die Prozessparameter der Fließlawine (nach: Kofler und Fischer, 2015).

| Bezeichnung | Formelzeichen | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Reibungskoeffizient | $\mu = \tan\delta$ | - | 0.2 |
| Turbulenzkoeffizient | $\xi$ | $m/s^2$ | 6000 |
| Erosionsenergie | $e_b$ | J/kg | 20000 |
| Referenzseehöhe | $z_{ref}$ | m | 1583 |
| Schneemächtigkeit bei der Referenzseehöhe | $d_0(z_{ref})$ | m | 1.57 |
| Gradient der Schneemächtigkeit mit Seehöhe | $\Delta d$ | cm/100 m | 7 |
| Anbruchdichte | $\rho_{rel}$ | $kg/m^3$ | 200 |
| Dichte aufnehmbarer Schnee | $\rho_{ent}$ | $kg/m^3$ | 200 |
| Fließdichte | $\bar{\rho}$ | $kg/m^3$ | 200 |

Mit den in der Tabelle 9.4 angegebenen Annahmen erhält man das in Abbildung 9.6 dargestellte Ergebnis für die dynamischen Spitzendrücke. Bei dieser Simulation trifft die Lawine auf die beiden abgebildeten Häuser und erreicht beim Haus Litzner einen dynamischen Spitzendruck $> 50$ kPa, sowie 5 bis 10 kPa beim Haus Zangerl.

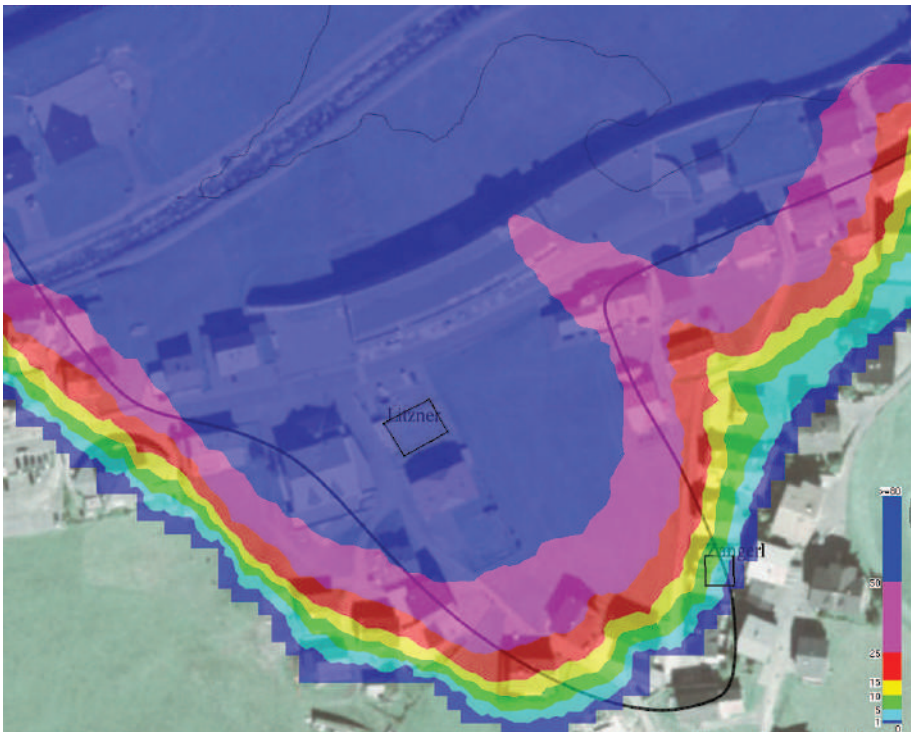



Abbildung 9.6: Ergebnisausschnitt der dynamischen Spitzendrücke in [kPa] der „CoSiCa II - Standard“ Simulation und der dokumentierte Ablagerungsbereich (schwarze dicke Linie) aus Kofler und Fischer (2015)

## 9.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

Aus den Abbildungen 9.3 bis 9.6 lässt sich eine große Streubreite der Ergebnisse für die dynamischen Spitzendrücke feststellen. Wenn man zum Beispiel den dynamischen Spitzendruck der beiden abgebildeten Häusern betrachtet, schwankt dieser beim Haus Zangerl zwischen 0 und 25 kPa und beim Haus Litzner zwischen 0 und $>$ 50 kPa. Es ist sehr schwierig mit einer Lawinensimulation eine konkrete Aussage über den dynamischen Spitzendruck an einer bestimmten Stelle der Lawine zu geben und darüber hinaus noch viel schwieriger das Schadenspotential der Lawine zu beurteilen. Der Grund dafür ist die große Streubreite der Ergebnisse der Lawinensimulationen. Die implementierten Modelle in einem Lawinensimulationsprogramm, wie SamosAT, stellen grobe Vereinfachungen der Modellgleichungen und der physikalischen Größen (z.B.: Fließdichte $\bar{\rho}$) dar. Durch diese Vereinfachungen müssen die Modelle zum Beispiel auf Auslauflängen kalibriert werden. Theoretisch wäre dies auch über die in dieser Arbeit angeführten Rückrechnungen von Zerstörungsdrücken möglich. Doch aufgrund der großen Unsicherheiten, welche im Abschnitt 5.2.5 beschrieben sind und der Streubreite der Ergebnisse in diesem Kapitel, können die Modelle eines Lawinensimulationsprogramm nur sehr schwer mit Zerstörungsdrücken kalibriert werden. Dies zeigt auch die Gegenüberstellung von den Simulationsergebnissen und den berechneten Zerstörungsdrücken in Kapitel 10.

KAPITEL 10

# Zusammenfassung der Berechnungen

Im Kapitel 10 werden die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse von Rückrechnungen einer Druckwirkung auf das Haus Zangerl Paula zusammengefasst und verglichen. Dies soll die Varianz der erhaltenen Ergebnisse und die Unsicherheiten bei der Ermittlung eines tatsächlich auftretenden Zerstörungsdrucks oder Lawinendrucks veranschaulichen. Für die Interpretation der Ergebnisse im Detail sei auf die Kapitel 5, 6, 8 und 9 verwiesen.

In dieser Masterarbeit werden verschiedene Rückrechnungsmethoden untersucht und gegenübergestellt. In der Abbildung 10.1 sind die erhaltenen Ergebnisse der Rückrechnungen für den Zerstörungsdruck und den dynamischen Spitzendruck am Haus Zangerl Paula zusammengefasst dargestellt.

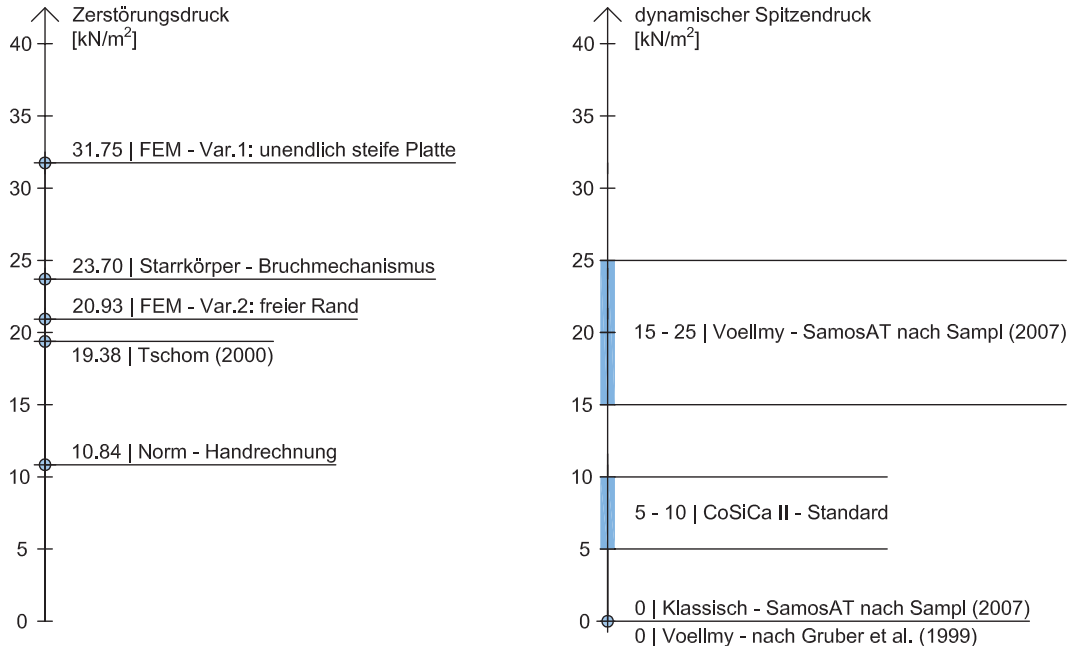



Abbildung 10.1: Ergebnisse von Rückrechnungen der Zerstörungsdrücke und der dynamischen Spitzendrücke auf das Haus Zangerl Paula.

Aus dieser Abbildung lässt sich eine große Varianz der erhaltenen Ergebnisse für den Zerstörungsdruck, sowie den dynamischen Spitzendruck feststellen. Der rückgerechnete Zerstörungsdruck schwankt ungefähr zwischen 10 und 30 $\mathrm{kN/m^2}$ und der dynamische Spitzendruck zwischen 0 und 25 $\mathrm{kN/m^2}$. Diese Vielzahl verschiedener Rückrechnungsergebnisse zeigt, dass die Modelle eines Lawinensimulationsprogramms sehr schwer mit Zerstörungsdrücken kalibriert werden können.

KAPITEL 11

# Schlussfolgerung und Ausblick

Im Zuge dieser Masterarbeit werden Rückrechnungen des Zerstörungsdrucks aus verschiedenen Objektschäden ausführlich untersucht. Weiters werden die dynamischen Spitzendrücke der Wasserleiterlawine im Bereich des diskutierten Hauses Zangerl Paula mit dem Lawinensimulationsprogramm SamosAT analysiert und ausgewertet.
Einleitend setzt sich diese Arbeit umfassend mit den zum Thema Schadwirkung von Lawinen passenden Normen und Literaturquellen auseinander. Zum Schadenspotential von Lawinen angegebenen Tabellen in der Literatur kann aus übereinstimmenden Expertenmeinungen und Literaturrecherchen zusammengefasst postuliert werden, dass die dort beschriebenen Lawinendrücke eine sehr starke Varianz aufweisen und damit die Aussagekraft dieser Tabellen als sehr gering einzustufen ist. Die in den Normen beschriebenen Möglichkeiten einen dynamischen Druck zu Kalkulieren basieren immer auf der Gleichung $p = \rho\, v^2$, welche eine starke Vereinfachung darstellt, wenn man den komplexen Prozess einer Lawine bedenkt.
In der umfassenden Auseinandersetzung mit Rückrechnungen auf einen Zerstörungsdruck kann festgestellt werden, dass der tatsächlich auftretende Zerstörungsdruck wegen der großen Unsicherheiten im Bezug auf den Versagensmechanismus, der Aufteilung der Kräfte, der Materialkennwerte, der Lagerungsbedingungen und der Einwirkungsfläche nur sehr grob zu bestimmen ist.
In Anbetracht der Fließlawinensimulationen der Wasserleiterlawine in Galtür stellt sich heraus, dass an einer bestimmten Stelle im Gelände ein dynamischer Spitzendruck zwischen 0 kPa und größer 50 kPa, je nach gewählten Eingangsparametern, auftreten kann. Dies hat zur Folge, dass die Wahl der Eingangsparameter und im Speziellen das gewählte Reibungsmodell einen sehr großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Durch die große Varianz der Ergebnisse ist es schwierig eine konkrete Aussage über den dynamischen Spitzendruck an einer bestimmten Stelle zu treffen. Außerdem ist das Kalibrieren von implementierten Modellen in Lawinensimulationsprogrammen über rückgerechnete Zerstörungsdrücke, aufgrund der großen Unsicherheiten von Rückrechnungen, sehr schwer möglich.

Diese Arbeit legt den Focus auf die Rückrechnung eines Zerstörungsdruckes aus einem beschädigten Bauteil. Ein weiterer wichtiger Schritt wäre der Versuch aus einem intakten Bauteil einen Zerstörungsdruck zu berechnen. Natürlich blieben die beschriebenen Unsicherheiten und Probleme bestehen, jedoch könnte somit eine Aussage über das nicht erreichen eines bestimmten Lawinendruckes getroffen werden.
Die bisherigen Versuche einer Fließlawinensimulation der Wasserleiterlawine in Galtür liefern hinsichtlich der Ergebnisse des dynamischen Spitzendruckes kein zufriedenstellendes Ergebnis. Daher sollte man in einer weiteren Untersuchung dieselbe Lawine mit dem in SamosAT implementierten Staublawinenmodell neu berechnen und die durch dieses Modell erhaltenen dynamischen Spitzendrücke auswerten.
Aufgrund der vielen Unsicherheiten, Variablen und Probleme, Lawinendrücke oder Zerstörungsdrücke zu berechnen, sollte man die Druckmessungen in den dafür geeigneten Testgebieten noch mehr forcieren.

# Literaturverzeichnis


Berthet-Rambaud, P., Limam, A., Roenelle, P., Rapin, F., Tacnet, J.-M., Mazars, J., et al. (2007). Avalanche action on rigid structures: Back-analysis of taconnaz deflective walls' collapse in february 1999. *Cold regions science and technology*, 47(1):16–31.

BFW (2015). Katastrophenuntersuchungen an Lawinen. `http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=2370&opts=3111100003&search=`; abgerufen am 27.07.15.

De Biagi, V., Chiaia, B., und Frigo, B. (2015). Impact of snow avalanche on buildings: Forces estimation from structural back-analyses. *Engineering Structures*, 92:15–28.

Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (2000). *Der Lawinenwinter 1999.Ereignisanalyse*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung,Davos.

Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., Margreth, S., Diefenbach, L., und Bartelt, P. (2015). Forest damage and snow avalanche flow regime. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3(1):535–574.

Fellin, W. (2013). *Einführung in Eis-, Schnee- und Lawinenmechanik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Fischer, J.-T. und Kofler, A. (2013). SamosAT CoSiCa - Concepts for enhanced Simulation and multivariate Calibration. *Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft*.

Furtmüller, T. und Adam, C. (2011). Numerical modeling of the in-plane behavior of historical brick masonry walls. *Acta mechanica*, 221(1-2):65–77.

Gabl, K. und Lackinger, B. (2000). Lawinenhandbuch. *Tyrolia-Verlag, Innsbruck*, 7.Auflage.

Granig, M., Jörg, P., und Fischer, J. (2013). Systematic practical evaluation of snow entrainment with the avalanche simulation model samosat. In *International Snow Science Workshop Grenoble Chamonix Mont-Blanc*.

Gruber, U., Bartelt, P., und Margreth, S. (1999). Anleitung zur Berechnung von Fließlawinen: Neue Berechnungsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung. *WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos*.

GZP-Richtlinien (2011). Richtlinien für die Gefahrenzonenplanung des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung. Stand: Februar 2011.

Honig, J., Bartelt, P., und Bühler, Y. (2014). West twin avalanche helicopter involvment - How safe are our pick-up locations? *Proceedings, International Snow Science Workshop, Banff, 2014*.

Issler, D. (1999). Berücksichtigung der Staublawine in der Gefahrenkartierung: Neue Berechnungsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung. *WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos*.

Jäger, W. (2007). *Mauerwerk Kalender 2007*. Ernst & Sohn - Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.

Jörg, P. und Granig, M. (2010). Rekalibrierung SamosAT - Suspensionsmodell 2010. *Forsttechnischer Dienst für Wildbach-und Lawinenverbauung, Stabstelle Schnee und Lawinen. Schwaz*.

Kofler, A. und Fischer, J.-T. (2015). CoSiCa II - Multivariate Parameteroptimierung von SamosAT. *Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft*.

Krapfenbauer, R. und Sträussler, E. (2004). Bautabellen. *Jugend und Volk, Wien*.

Mang, H. A. und Hofstetter, G. (2013). *Festigkeitslehre*. Springer-Verlag.

Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. In *Forum für Wissen 2004*, Seiten 21–26.

Margreth, S. (2007). Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe . *Bundesamt für Umwelt BAFU,Umwelt-Vollzug Bern; WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos*.

Margreth, S. (2015). Technischer Lawinenschutz: Planung und Ausführung von Stützverbauungen, Lawinengalerien und Dämmen. *Vortrag ETH Zürich*.

ÖNORM B 3341 (1995). Mauermörtel - Begriffsbestimmungen, Einteilungskriterien, Anforderungen und Normkennzeichnung. *Österreichisches Normungsinstitut*, Ausgabe 1995-01-01. Zurückziehung: 2002-02-01.

ÖNORM EN 1990 (2013). Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. *Österreichisches Normungsinstitut*, Ausgabe 2013-03-15.

ÖNORM EN 1996-1-1 (2013). Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (konsolidierte Fassung). *Österreichisches Normungsinstitut*, Ausgabe 2013-01-01.

ÖNORM EN 998-2 (2010). Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 2: Mauermörtel. *Österreichisches Normungsinstitut*, Ausgabe 2010-11-01.

Oberndorfer, S. und Granig, M. (2007). Modellkalibrierung des Lawinensimulationsmodells SamosAT. *Forsttechnischer Dienst für Wildbach-und Lawinenverbauung, Stabstelle Schnee und Lawinen. Schwaz*.

ONR 24805 (2010). Permanenter technischer Lawinenschutz – Benennungen und Definitionen sowie statische und dynamische Einwirkungen. *Österreichisches Normungsinstitut*, Ausgabe 2010-06-01.

Platzer, M. (2014). Neubau bzw. Wiederaufbau der Stettiner Hütte, Lawinen - Gutachten. *are - alpine risk engineering*.

Rapin, F. (2002). A new scale for avalanche intensity. In *International Snow Science Workshop*, volume 2, Seiten 103–110.

Rudolf-Miklau, F. und Sauermoser, S. (2011). *Handbuch Technischer Lawinenschutz*. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG, Berlin.

Salm, B., Benno, Z., und Viktor, B. (1987). Vorlesung: Schnee, Lawinen und Lawinenschutz. *ETH Zürich*.

Sampl, P. (2007). Modelltheorie und Numerik. *AVL List GmbH in Zusammenarbeit mit SSL(WLV) und BFW*.

Sauermoser, S., Herbert, A., Hagen, F., und Sailer, R. (2004). Recalculation of the Galtuer avalanche with different simulation models-a comparison of the results. In *Snow Engineering V: Proceedings of the Fifth International Conference on Snow Engineering, 5-8 July 2004, Davos, Switzerland*, Seite 335. CRC Press.

Sovilla, B., McElwaine, J. N., und Louge, M. Y. (2015). The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique*, 16(1):97–104.

SSL (2015). Interne Unterlagen der Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLV. Einsichtnahme am: 06.05.15.

Stoffel, L. (2010). Artificial avalanche release in Switzerland - case studies villages Aosta, 11 november 2010. *WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos*.

Suda, J. und Rudolf-Miklau, F. (2012). *Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz*. Springer-Verlag Wien.

Tschom, H. (1984). Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes bei der Gidis-Portrinnerlawine, Moosbachlawine, Madleinlawine, Schiltilawine. Interne Unterlagen der Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLV.

Tschom, H. (1986). Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes bei der Verwalllawine. Interne Unterlagen der Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLV.

Tschom, H. (1988). Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes bei der Wolfsgrubenlawine. Interne Unterlagen der Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLV.

Tschom, H. (2000). Rückrechnungen des Zerstörungsdruckes bei der Wasserleiterlawine mit nachvollziehbarem Berechnungsbeispiel. Interne Unterlagen der Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLV und von Tschom H.

UN News Centre (2015). Five years after Indian Ocean tsunami, affected nations rebuilding better - UN. `http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=33365#.VbjPEvkgs-o`; abgerufen am 27.07.15.

Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, 73(12,15,17,19):159–165,212–217,246–249,280–285.

Wesche, K. (1981). *Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk*.

Wilhelm, F. und Schustereder, C. (2010). Skriptum - Mauerwerksbau. *Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften*. 2.Auflage.

Wommelsdorff, O. und Albert, A. (2012). *Stahlbetonbau Bemessung und Konstruktion Teil 2 Stützen, Sondergebiete des Stahlbetonbaus*.

Zeit Online (2015). Erdbeben: Wandergebiet in Nepal evakuiert. `http://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2015-05/nepal-erdbeben-evakuierung-langtang-tal`; abgerufen am 27.07.15.

Zilch, K. und Zehetmaier, G. (2006). *Bemessung im konstruktiven Betonbau: Grundlagen und Tragfähigkeit*. Springer-Verlag.

# Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit der Arbeitsbereich und das Institut, an dem die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und der Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat „pdf“ ohne Kennwortschutz bei dem Betreuer einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur der Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck, am 15.09.2015 .....

Lukas SCHROLL