

**Analyse der physischen Vulnerabilität von Wohngebäuden
gegenüber feststoffführenden Überschwemmungen**

Fallstudie Baltschieder 2000



Masterarbeit (GEO 511) der Mathematisch- naturwissenschaftlichen Fakultät
Universität Zürich
Gruppe für Hydrologie und Klima (H₂K)

Vorgelegt von:

Martin Seiler
09-125-071

Fakultätsvertretung:

Prof. Dr. Jan Seibert

Betreut durch:

Dr. David Vetsch
ETH, VAW
Wolfgang-Pauli-Strasse 27
8093 Zürich
vetsch@vaw.baug.ethz.ch
+41 44 632 41 04

Msc Matthias Künzler
Schweizerische Mobiliar Versicherungsgesellschaft AG
Bundesgasse 35
3001 Bern
matthias.kuenzler@mobi.ch
+ 031 389 64 06

Titelbild: Wohnhaus in Baltschieder unmittelbar nach der Überschwemmung vom 15. Oktober 2000 (Photograph unbekannt).

Vorwort

Ein verregneter Tag am 15. Oktober 2000. Als 12-Jähriger stehe ich mit meinen Gummistiefeln am Uferdamm der Lonza. Gebannt folgt mein Blick dem schlammig, dreckigen Wasser, dass an uns vorbeirauscht. Baumstämme von mächtigen Lärchen tanzen wie Petflaschen auf dem wilden Wellenspiel. Die Brücken sind wo möglich demontiert oder überflutbar gemacht worden. Mit besorgter Miene blicken Passanten unter ihren Regenschirmen hervor auf die Fluten. Es herrscht eine angespannte und hektische Stimmung. Sandsäcke werden gefüllt, Feuerwehrautos fahren mit Blaulicht vorbei und zwei Bagger fördern unablässig grosse Steine und Schlamm aus dem Gerinne. Die Szenerie wird durch das unablässige, laute, dumpfe Grollen und Rauschen der Lonza untermalt. Ich wende mich ab und stapfe mit meinem Vater zum Auto. Auf der kurzen Rückfahrt nach Hause fahren wir an überfluteten Wiesen vorbei. Im lokalen Radio höre ich die aufgeregten Stimme eines Reporters, der von einer grossen Überschwemmung in Baltschieder berichtet.

Ziemlich genau 14 Jahre später (und ohne Gummistiefel) kann ich nun meine Masterarbeit im Rahmen einer Studie über die physische Vulnerabilität einiger während des Ereignisses in Baltschieder betroffenen Wohngebäuden abschliessen. Auf meinem Weg dahin haben mich meine Eltern jederzeit unterstützt. Ihnen spreche ich meinen ersten Dank aus.

Weiter danke ich Matthias Künzler von der Mobiliar für seine Hilfe bei Fragen aus der Versicherungspraxis und der Beschaffung der Versicherungsdaten, welche die vorliegende Masterarbeit erst ermöglichten.

Dr. David Vetsch vom VAW gilt mein Dankeschön für die Betreuung im Zusammenhang mit BASEMENT und dem unermüdlichen Kampf gegen widerspenstige Walliser Katasterplangrundlagen.

Prof. Dr. Jan Seibert danke ich für die Bereitschaft die Fakultätsvertretung seitens der Universität Zürich zu übernehmen.

Beim Gemeindepräsidenten aus Baltschieder Markus Nellen bedanke ich mich für das zur Verfügung gestellte Bildmaterial des Ereignisses, sowie die Auskünfte bezüglich Ereignisablauf am 15. Oktober 2000.

Schliesslich danke ich meiner Freundin Sabine für das aufmerksame Korrekturlesen.

Zusammenfassung

Aufgrund der sozio-ökonomischen Entwicklung der vergangenen Jahre und Jahrzehnte sind Schwemmkegel von Gebirgsflüssen in den Alpen zum Teil stark mit menschlicher Infrastruktur und Siedlungen überbaut worden. Das Risiko im Zusammenhang mit feststoffführenden Überschwemmungen steigt aufgrund des gewachsenen Schadenpotentials an und wird wesentlich durch die physische Vulnerabilität der Gebäude beeinflusst. Die physische Vulnerabilität beschreibt dabei den zu erwartenden Schaden bei einer Einwirkung eines gefährdenden Prozesses einer bestimmten Intensität auf die Gebäudestruktur mit einem Wert zwischen 0 (kein Schaden) und 1 (Totalschaden). Bei diesem Konzept wird also die Prozessintensität mit dem entstehenden Schaden am Gebäude im Einflussbereich von feststoffführenden Überschwemmungen verknüpft.

Eine vertiefte Kenntnis der physischen Vulnerabilität und gebäudespezifischen Faktoren, welche einen Einfluss darauf nehmen, sind daher sowohl für die Risikoquantifizierung, als auch für eine risikogerechte Konzeption von Wohngebäuden entscheidend. Aufgrund von verhältnismässig wenigen empirischen Untersuchungen und der schwierigen Datenlage ist das Wissen bezüglich physischer Vulnerabilität bei feststoffführenden Überschwemmungen jedoch nach wie vor limitiert. Ausserdem wird die Intensität bei Vulnerabilitätsanalysen in der Schweiz bisher durch das primär auf der menschlichen Gefährdung basierende System nach Loat und Petraschek (1997) klassiert. Dieses Klassierungssystem berücksichtigt jedoch nicht zwingend für die Schadenentstehung und damit für das Risiko entscheidende Prozesse am Gebäude. Schliesslich ist die bisher gängige Rekonstruktion der Intensitätswerte Fliesstiefe und -geschwindigkeit aufgrund von Zeugenberichten, Bildmaterial und Abschätzungen mit einiger Unsicherheit behaftet, die sich direkt auf die Qualität der Vulnerabilitätsanalyse auswirken kann.

Die vorliegende Masterarbeit soll mit einer Fallstudie primär einen Beitrag zur Vergrösserung der Datengrundlage leisten und zur Validierung und Vertiefung des Wissens im Zusammenhang mit physischer Vulnerabilität beitragen. Weiter wird ein alternatives Klassierungssystem der Intensität hergeleitet und angewendet, welches die Schadenentstehung am Gebäude möglichst gut repräsentieren soll. Ausserdem ist ein methodisches Vorgehen für Vulnerabilitätsanalysen mit BASEMENT entwickelt und angewendet worden. Das numerische Simulationsprogramm BASEMENT ist dabei als Hilfsmittel zur dynamischen ex-post Rekonstruktion von Intensitätswerten wie Fliesstiefe und -geschwindigkeit zu sehen. Es verringert als solches diesbezüglich die Unsicherheiten. Schliesslich sollten anhand der Fallstudie in Baltschieder auch Faktoren am Gebäude und der unmittelbaren Umgebung identifiziert werden, welche einen Einfluss auf die physische Vulnerabilität genommen haben.

Die physische Dimension der Vulnerabilität wurde anhand von 20 betroffenen Wohngebäuden des Überschwemmungsereignisses in Baltschieder im Jahr 2000 untersucht. In einem ersten Schritt sind dabei die Prozessintensitäten an jedem Gebäude ex-post anhand des numerischen 2D-Simulationsprogrammes BASEMENT nachsimuliert worden. Im Zuge dieser Prozessrekonstruktion wurden die Simulationsergebnisse jeweils durch die anhand von Photos und Karten rekonstruierten Ablagerungshöhen kalibriert.

Basierend auf der Widerstandsfähigkeit von Fensterscheiben als vulnerabelste Elemente der Gebäudehülle ist dann ein neues, die Schadenentstehung berücksichtigendes Klassierungssystem der Intensität entwickelt worden. Auf Grundlage dieses neu entwickelten Klassierungssystems und den simulierten zeitgleichen Ablagerungshöhen und Fliesstiefen erfolgte

dann die Zuordnung eines Wohngebäude zur Intensitätsklasse schwach, mittel oder stark. Die mit dem Wohngebäude verknüpfte Schadenempfindlichkeit ist dann der entsprechenden Intensitätsklasse zugerechnet worden. Die Schadenempfindlichkeit bezeichnet dabei das Verhältnis aus Schadensumme und Versicherungswert und stellt somit den Anteil des Gebäudes dar, welcher durch das Ereignis zerstört wurde. Die durch die Verknüpfung von Intensitätsklasse und Schadenempfindlichkeit bestimmten Vulnerabilitätswerte zeigen eine Zunahme der Schadenempfindlichkeit mit ansteigender Intensität.

Die ermittelten Vulnerabilitätswerte werden dann mit den Ergebnissen des konventionellen auf der Multiplikation von Fliesstiefe und -geschwindigkeit beruhenden Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997) verglichen und diskutiert. Sowohl die Vulnerabilitätswerte des neu entwickelten als auch des konventionellen Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997) sowie deren Rohdaten stehen zur weiteren Validierung und weiterführende Studien zur Verfügung.

Die im Rahmen dieser Arbeit angewendete und entwickelte Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse mit Hilfe der ex-post Rekonstruktion von Intensitätswerten mit BASEMENT und dem schadenbasierten Klassierungssystem wird ausführlich beschrieben und diskutiert. Sie kann als Grundlage für weitere Vulnerabilitätsanalysen dienen.

Neben der eigentlichen Bestimmung von physischen Vulnerabilitätswerten wurden mögliche objekt- und umgebungsspezifische Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität anhand eines visuellen Vergleichs von angeströmten Gebäudefassaden identifiziert. Der Vergleich wurde dabei jeweils zwischen den Gebäuden mit maximalen und minimalen Schadenempfindlichkeiten innerhalb der gleichen Intensitätsklasse des neu entwickelten Klassierungssystems durchgeführt. Der Einfluss der Prozessintensität auf die physische Vulnerabilität wird somit verringert und es konnten so vor allem die Art und Lage von Gebäudeöffnungen sowie die Nutzungsart des Erdgeschosses als Gebäude - inhärente Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität in Baltschieder identifiziert werden. Diese Faktoren könnten in Zukunft eine wichtige Rolle bei der naturgefahrengerechten Planung und dem Bau von Wohngebäuden im Einflussbereich von feststoffführenden Überschwemmungen spielen. Bezüglich der Umgebung war bei den Wohngebäuden in Baltschieder kein klarer Einfluss auszumachen.

Aufgrund der beschränkten Datenlage sind die hergeleiteten Vulnerabilitätswerte und Einflussfaktoren in weiterführenden Studien zwingend zu validieren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIV
KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1.1 Einbettung des Themas	3
1.2 Forschungsstand	4
1.3 Problemstellung	17
1.4 Zielsetzungen und Fragestellungen	20
1.5 Aufbau der Arbeit	21
KAPITEL 2: FLUVIATILER FESTSTOFFTRANSPORT	23
2.1 Definition	25
2.1.1 Abgrenzung fluviatiler Feststofftransport zum Murgang / murartigem Feststofftransport	25
2.2 Das System Gebirgsfluss	27
2.2.1 Sammelgebiet	28
2.2.2 Umlagerungsstrecke	28
2.2.3 Ablagerungsgebiet	29
2.3 Prozessablauf	29
2.3.1 Geschiebeaufbereitung	30
2.3.2 Geschiebe- und Schwemmholzlieferung.....	30
2.3.3 Feststofftransport	31
2.3.3.1 Mobilisierung.....	31
2.3.3.1 Verlagerung / Transport.....	32
2.3.3.3 Ablagerung	34
2.4 Ursachen für Überschwemmungen mit fluvialem Feststofftransport	35
2.4.1 Grunddisposition	36
2.4.2 Variable Disposition.....	37
2.4.3 Auslösendes Ereignis und Abflussbildung	38
2.4.3.1 Niederschlagsabhängige Auslösung	38
2.4.3.2 Niederschlagsunabhängige Auslösung.....	39
KAPITEL 3: RISIKO UND VULNERABILITÄT	41
3.1 Das Risikokonzept	43
3.2 Vulnerabilität	44

3.2.1 Physische Vulnerabilität	44
3.2.2 Vulnerabilitätsfunktionen und statistische Masszahlen der Vulnerabilität	45
3.2.2.1 Intensitätskriterium $v \cdot h$ nach Loat und Petraschek (1997).....	46
3.3 Gebäudevulnerabilität gegenüber dynamischen Überschwemmungen	48
3.3.1 Prozessparameter	49
3.3.2 Objektparameter.....	52
3.3.3 Umgebungsparameter.....	52
 KAPITEL 4: UNTERSUCHUNGSSTANDORT	 53
4.1 Der Baltschiederbach und sein Einzugsgebiet	55
4.2 Das Dorf Baltschieder	56
4.3 Wohngebäude in Baltschieder.....	56
4.4 Ereignisablauf.....	57
 KAPITEL 5: METHODEN	 59
5.1 Simulation	61
5.1.1 Grundlagendaten zur Gittererstellung	62
5.1.2 Erstellung Berechnungsgitter	65
5.1.3 BASEMENT Randbedingungen	67
5.1.4 BASEMENT Simulation.....	70
5.1.5 Bestimmung der Intensitätswerte Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit. 72	
5.2 Kalibrierungsprozess.....	73
5.2.1 Kalibrierungsgrundlagen	74
5.2.2 Kalibrierung	76
5.3 Herleitung eines schadenbasierten Klassierungssystems.....	77
5.3.1 Rolle der Gebäudeöffnungen im Zusammenhang mit der physischen Vulnerabilität.....	78
5.3.2 Druckfestigkeit von Fensterscheiben gegenüber Strömungsdruck	79
5.3.2.1 Die Einwirkung der hydrodynamischen Beanspruchung auf Fensterscheiben	79
5.3.2.2 Die Einwirkung der hydrostatischen Beanspruchung auf Fensterscheiben.....	80
5.3.3 Die kinetische Energieaufnahmekapazität von Fensterscheiben gegenüber anprallenden Feststoffen.....	81
5.3.3.1 Die Einwirkung des Feststoffanpralls bei feststoffführenden Überschwemmungen....	81
5.3.4 Synthese Intensitätskriterium	84
5.3.5 Bestimmung der Intensitätswerte und -kriterien für jedes Gebäude	85
5.4 Herleitung des Klassierungssystems	86
5.4.1 Herleitung der Klassengrenzen	87
5.4.2 Definition der Klassengrenzen Intensitätslassen.....	89
5.5 Bestimmung der physischen Vulnerabilität	90
5.5.1 Bestimmung der Schadenempfindlichkeit	91

5.5.1.1 Methode zur Bestimmung der Schadenempfindlichkeit, des Gebäudewertes und der Schadensumme	92
5.5.2 Bestimmung der Physischen Vulnerabilität	93
5.6 Vergleich mit dem Intensitätskriterium v^*h	93
5.6.1 Bestimmung Intensitätskriterium v^*h	93
5.7 Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparameter mit einem Einfluss auf die physische Vulnerabilität	94
 KAPITEL 6: RESULTATE	 95
6.1 Ergebnis der Rekonstruktion der Prozessintensität mit BASEMENT	97
6.1.1 Intensitätswerte für das Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit.....	98
6.1.2 Intensitätswerte für das Intensitätskriterium v^*h	101
6.2 Zuordnung zur Intensitätsklasse	102
6.2.1 Zuordnung der Gebäude zu einer Intensitätsklasse auf Grundlage des neu entwickelten, auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Klassierungssystems	102
6.2.2 Zuordnung zu einer Intensitätsklasse auf Grundlage des Intensitätskriteriums v^*h	103
6.3 Schadenempfindlichkeit der Wohngebäude in Baltschieder	104
6.4 Physische Vulnerabilität der Wohngebäude in Baltschieder.....	106
6.4.1 Physische Vulnerabilität auf Grundlage des schadenbasierten Klassierungssystems	106
6.4.2 Physische Vulnerabilität auf Grundlage des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997)	110
6.5 Vergleich der physischen Vulnerabilität des schadenbasierten Klassierungssystems und des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997)	113
6.6 Identifikation von Objekt- und Umgebungsparameter mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität.....	117
6.6.1 Vergleich der Schadenempfindlichkeits-Extrema in der schwachen Intensitätsklasse	117
6.6.2 Vergleich der Extrema in der mittleren Intensitätsklasse	120
6.7 Methodik der physischen Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT	122
 KAPITEL 7: DISKUSSION	 125
7.1 Simulationsergebnisse	127
7.1.1 Simulierte Ablagerungshöhen	127
7.1.2 Simulationsergebnisse der effektiven Wirkungshöhe.....	129
7.1.3 Simulationsergebnisse der Fliessgeschwindigkeiten	130
7.1.4 Simuliertes Intensitätskriteriums v^*h	131
7.2 Schadenempfindlichkeit	132
7.3 Zuordnung zu den Intensitätsklassen – das Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997).....	133

7.3.1 Limitationen des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ im Kontext von Vulnerabilitätsanalysen	133
7.4 Physische Vulnerabilität.....	135
7.4.1 Physische Vulnerabilitätswerte.....	136
7.4.2 Streuverhalten der physischen Vulnerabilität	136
7.5 Objekt- und Umgebungsparameter als Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität.....	140
7.5.1 Eine an feststoffführende, dynamische Überschwemmungen angepasste Bauweise .	142
7.6 Methode zur Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT.....	143
7.6.1 Simulation.....	143
7.6.2 Kalibrierung	144
7.6.3 Zuordnung zu den Intensitätsklassen.....	145
7.6.3.1 Diskussion des Kriteriums effektive Wirkungshöhe.....	145
7.6.3.2 Diskussion des Intensitätskriteriums Fließgeschwindigkeit.....	146
7.6.4 Bestimmung der Schadenempfindlichkeit	146
KAPITEL 8: SCHLUSSFOLGERUNG - AUSBLICK.....	149
8.1 Schlussfolgerung	151
8.1.1 Schadenbasiertes Klassierungssystem.....	151
8.1.2 Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen	152
8.1.3 Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparametern mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität.....	153
8.1.4 Methode für die Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT	153
8.2 Ausblick	154
LITERATURVERZEICHNIS.....	157
ANHANG	169
Persönliche Erklärung	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Graphische Darstellung der Gebäudedichte pro Quadratkilometer in der Schweiz nach Jaboyedoff und Bonnard (2007).....	3
Abbildung 2: Intensität $v \cdot h$ vs. Schadenempfindlichkeit der 111 durch dynamische Überschwemmungen betroffene Gebäude (Kimmerle, 2002).....	6
Abbildung 3: Vulnerabilitätsfunktion nach Fuchs et al. (2007).	7
Abbildung 4: Beziehung zwischen Vulnerabilität und Ablagerungshöhe gemäss Akbas et al. (2009).....	8
Abbildung 5: Vulnerabilitätsfunktionen für geschiebeführende Hochwasser nach Totschnig et al. (2011). Die Frechet Funktion no.2 mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten ist im Diagramm fett dargestellt.	10
Abbildung 6: Vulnerabilitätskurve (blau) für 51 Gebäude und die Validationskurve (rot), welche auf Schadenkompensationszahlungen für 34 Gebäude beruht (Papathoma-Köhle et al., 2012a).	12
Abbildung 7: Vergleich der Vulnerabilitätskurven für fluviatilen Feststofftransport und Murgänge auf Grundlage von Daten aus der Studie von Akbas et al. (2009) (rote Punkte) und dem Ereignis am Wartschenbach (blaue Dreiecke) (Totschnig und Fuchs, 2012).	13
Abbildung 8: Vulnerabilitätsfunktion nach Totschnig und Fuchs (2013) mit den zur Herleitung der Funktion verwendeten Daten (blaue Punkte) und den für die Validierung verwendeten Daten aus der italienischen Studie (grüne Dreiecke).	14
Abbildung 9: Intensitäts-Wahrscheinlichkeitsdiagramm mit der Definition erheblicher Gefährdung (rot), mittlerer Gefährdung (blau), geringer Gefährdung (gelb) und Restgefährdung (gelb-weiss schraffiert). Abgeändert nach Kämpf (2011).	19
Abbildung 10: Funktionales Dreieck aus Feinmaterial, Grobmaterial und Wasser mit verschiedenen gravitativen Massenbewegungen (Hübl et al., 2006).	25
Abbildung 11: A: Darstellung der drei räumlichen Komponenten eines Gebirgsflusssystemes mit Sammelgebiet, Schluchtstrecke und Ablagerungsgebiet. B: Ausprägung eines Gebirgsflusssystemes ohne deutlich ausgeprägte Schluchtstrecke (Hübl et al., 2011).	28
Abbildung 12: Prozessablauf des Geschiebehaushalts im Zusammenhang mit fluviatilem Feststofftransport am Beispiel des Baltschiederbachs bei Tuntscheta auf 1013 m.ü.M (© Google Earth).	29
Abbildung 13: Potentielles Schwemmholz im Baltschiederbach bei „Äbi“ im Baltschiederatal.	31
Abbildung 14: Für Gebirgsflüsse typische Stufen-Becken-Struktur im Baltschiederbach bei „Äbi“.....	32
Abbildung 15: Schematische Darstellung des rollenden, gleitenden und springenden Geschiebetransportes auf einer stabilen Deckschicht entlang der Sohlenoberfläche und der in Suspension gehaltenen Partikeln. Die Fliessrichtung des Gewässers ist mit einem blauen Pfeil eingezeichnet (abgeändert nach Sendzik, 2003).	33
Abbildung 16: Horizontale Geschwindigkeitsverteilung und Ausrichtung eines einzelnen Baumstammes auf einem Fliessgewässer (Mazzorana, 2007).	34

Abbildung 17: Darstellung Verlagerung und Ablagerung als Funktion der dimensionslosen Schleppspannung θ_{cr} und der kritischen Korn-Reynolds-Zahl Re^*_{cr} (abgeändert nach Shields, 1936).	35
Abbildung 18: Zusammenspiel der Grunddisposition, variablen Disposition (zusammen aktuelle Disposition) und verschiedenen potentiell auslösenden Ereignissen, welche das System belasten (abgeändert nach Gamma, 2000).....	36
Abbildung 19: Die 4 Abflusstypen abgeändert gemäss VAW (1994) mit ansteigender Infiltrationskapazität von Abflusstyp 1 zu Abflusstyp 4.....	37
Abbildung 20: Methodischer Vorschlag für die Herleitung einer Vulnerabilitätsfunktion nach Fuchs et al. (2012).	45
Abbildung 21: Rückhaltende Gewichtskraft G und treibende Kraft F_D , welche auf eine in einer Wasserströmung mit Fliesstiefe h und Fliessgeschwindigkeit v stehende Person einwirkt (Bezzola, 2011).	46
Abbildung 22: Gefährdungen durch dynamische, feststoffführende Überschwemmungen nach Rudolf-Miklau et al. (2011).	51
Abbildung 23: Längsprofil des Baltschiederbachs klassiert nach Gerinneneigung mit einmündenden Zubringerbächen (Nigg et al., 2002).....	55
Abbildung 24: Der Baltschiederbach mit rot abgegrenztem Einzugsgebiet (© swisstopo).	56
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Feststoffbeiträge während des Ereignisses vom 15. Oktober 2000 entlang des Baltschiederbaches nach Jäggi et al. (2004).....	57
Abbildung 26: Schematisch skizziertes, methodisches Vorgehen zur Simulation mit BASE-MENT mit Kapitelangaben der einzelnen Teilschritte.	62
Abbildung 27: Digitales Höhenmodell vor (A) und nachdem (B) der Damm manuell entfernt wurde (siehe jeweils roter Pfeil).	63
Abbildung 28: Detailansicht des Katasterplans mit eingezeichneten Beispielen von Treppen, Mithöfen und Parzellengrenzen (rote Pfeile), welche für die Simulation aus dem Katasterplan herausgelöscht wurden.	64
Abbildung 29: Katasterplan vor (A) und nach (B) dem Herauslösen von überflüssigen Bruchkanten wie Parzellengrenzen, Treppen und Mithöfen.....	64
Abbildung 30: A: Standort des nach dem Ereignis im Jahr 2000 zu Gunsten des neuen Geschieberückhaltedammes abgerissenen Gebäudes mit einem roten Pfeil markiert. B: Eines der Photos welches zur Rekonstruktion der Standortes des abgerissenen Wohngebäudes beitrug. Das entsprechende Wohngebäude auf dem Photo ist mit einem roten Pfeil markiert (Photo: Andreas Götz).....	65
Abbildung 31: Grundlagendaten für die Erstellung des Quality Mesh mit Area points, Holes, Bruchkanten und den Modellgrenzen.....	66
Abbildung 32: Quality Mesh mit interpolierten Meshpunkten zur Höheninformation.....	67
Abbildung 33: 2dm-File als topographische Grundlage der Simulation.	67
Abbildung 34: In Visp aufgezeichneter Niederschlag (blau) und die modellierte Abflussganglinie des Baltschiederbaches (rot) vom 14.10 – 16.10.2014 (Nigg et al., 2002)	68
Abbildung 35: Abflussganglinie (Q) in blau und Sedimentganglinie (Q_b) in rot.	69

<i>Abbildung 36: Graphische Benutzeroberfläche von BASEMENT mit Beispieldaten für den Geschiebetransport.</i>	71
<i>Abbildung 37: 2dm-File mit dem schwarz markierten Zuflussort des Wassers den vier als Zugabeort des Sedimentes verwendeten Gitternetzdreiecken im Bereich des schwarzen Rechtecks.</i>	72
<i>Abbildung 38: Am blau dargestellten Monitoringpunkt an der dominant angeströmten Gebäudeseite wurden am Beispiel dieses Gebäudes für jeden Zeitschritt Werte für Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit als Textdatei ausgegeben.</i>	73
<i>Abbildung 39: Schematische Darstellung der Kalibrierung der Simulationsergebnisse anhand der Ablagerungshöhen.</i>	74
<i>Abbildung 40: A: Kalibrierungsphoto eines Wohngebäudes (Photograph unbekannt). B: Bis heute bestehende Treppenlaube als Massstab für die Quantifizierung der Ablagerungshöhe.</i>	75
<i>Abbildung 41: Kartendarstellung der zur Kalibrierung verwendeten Grundlagen. Die verwendeten Kalibrierungsphotos sind durchnummeriert.</i>	76
<i>Abbildung 42: Schematische Übersicht mit der Bestimmung der Intensitätskriterien für jedes Gebäude als erster methodischer Schritt für die Zuordnung des Gebäudes zu einer Intensitätsklasse mit Hilfe des neu entwickelten Klassierungssystems.</i>	78
<i>Abbildung 43: Während des Überschwemmungsereignisses in Baltschieder 2000 transportiertes und schliesslich abgelagertes Schwemmholz und Geschiebe, während der Aufräumarbeiten (Photograph unbekannt).</i>	82
<i>Abbildung 44: Im Vergleich zum Geschiebe, welches gleitend, rollend und springend entlang der Sohle transportiert wird, wird Schwemmholz an der Wasserspiegeloberfläche schwimmt.</i>	82
<i>Abbildung 45: Die Wasserspiegellage während eines Überschwemmungsereignisses ist von der Ablagerungsmächtigkeit und damit von der Lage der Sohle abhängig.</i>	84
<i>Abbildung 46: Schematische Übersicht über die Zuordnung der Gebäude zu den Intensitätsklassen aufgrund der Intensitätskriterien "effektive Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit" als Teilschritt zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität.</i>	87
<i>Abbildung 47: Das Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe visualisiert an einer Gebäudefassade mit schwacher Intensität (hellgrün < 1 m), mittlerer Intensität (mittelgrün > 1 und < 3.65) und starker Intensität (dunkelgrün > 3.65 m).</i>	88
<i>Abbildung 48: Schematische Übersicht über die einzelnen methodischen Schritte bei der Bestimmung der Schadenempfindlichkeit und der physischen Vulnerabilität.</i>	90
<i>Abbildung 49: Für die Studie verwendete, durchnummerierte betroffene Gebäude aus dem Portfolio der Mobilien. In Grün Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 und in Rot Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von > 0.00.</i>	92
<i>Abbildung 50: Darstellung der berechneten Ablagerungshöhen rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.</i>	97
<i>Abbildung 51: Darstellung der berechneten Fliesstiefen rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.</i>	98
<i>Abbildung 52: Darstellung der berechneten Fließgeschwindigkeiten rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.</i>	98

Abbildung 53: Räumliche Verteilung der Gebäude auf welche effektive Wirkungshöhen < 1 m und > 1 m gewirkt haben.....	100
Abbildung 54: Räumliche Verteilung der Wohngebäude welche durch eine Fliessgeschwindigkeit > 1 m/s und < 1 m/s betroffen waren.....	100
Abbildung 55: Räumliche Verteilung der Wohngebäude welche durch einen $v \cdot h$ -Wert < 0.5 m^2/s und > 0.5 m^2/s betroffen waren.....	102
Abbildung 56: Räumliche Verteilung der Schadenempfindlichkeit bei den betroffenen Wohngebäuden in Baltschieder.....	105
Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeit in den Intensitätsklassen schwach und mittel des Intensitätskriteriums mit effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit.....	107
Abbildung 58: Streuung der Schadenempfindlichkeiten innerhalb der auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit beruhenden Intensitätsklassen.....	108
Abbildung 59: Boxplots der Schadenempfindlichkeit für die auf Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Intensitätsklassen mit Median, 0.25-, 0.75-Quartil und Whisker.....	109
Abbildung 60: Diagramm der effektive Wirkungshöhe vs. Schadenempfindlichkeit mit sichtlicher Streuung der Datenpunkte zwischen 0.50 m und 1 m.....	109
Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten auf die einzelnen Intensitätsklassen basierend auf dem Intensitätskriterium $v \cdot h$	111
Abbildung 62: Streuung der Schadenempfindlichkeit innerhalb der drei Intensitätsklassen schwach, mittel und stark nach Loat und Petraschek (1997).....	112
Abbildung 63: Boxplotdarstellung der statistischen Masszahlen der drei Intensitätsklassen schwach, mittel und stark mit Median, 0.25-, 0.75-Quartil und Whisker.....	112
Abbildung 64: Diagramm $v \cdot h$ vs. Schadenempfindlichkeit mit geringer Streuung der Datenpunkte zwischen 0.00 m^2/s und 0.50 m^2/s . Die Intensitätsklassen nach Loat und Petraschek (1997) sind in hellgrün (schwach), mittelgrün (mittel) und dunkelgrün (stark) markiert.....	113
Abbildung 65: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten zwischen der Intensitätsklasse schwach der beiden Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit und $v \cdot h$	115
Abbildung 66: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten zwischen der Intensitätsklasse mittel der beiden Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe / Fliessgeschwindigkeit und $v \cdot h$	116
Abbildung 67: Vergleich der Schadenempfindlichkeits-Boxplots der Klassierungssysteme nach Loat und Petraschek ($v \cdot h$) und dem schadenbasierten Klassierungssystem (W.).....	117
Abbildung 68: A: Angeströmte Fassade des untersuchten Wohngebäudes Nr. 5. B: Die mit einem blauen Pfeil markierte Anströmrichtung ist identisch zum Strassenverlauf.....	118
Abbildung 69: A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 15. B: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 17 mit Stahlzaun auf Mauersockel im Vordergrund und der um 90 cm erhöhten Eingangstür.....	119

Abbildung 70 : A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 18. B: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 19 mit vorgelagertem Mehrfamilienreihenhaus in Anströmrichtung.	119
Abbildung 71: A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 20 mit Garagentor und Eingangstüre B: Durch Treppenabsatz gegenüber dem gewachsenen Terrain um 51 cm erhöhte Lage der Eingangstüre.....	120
Abbildung 72: Photo von den Aufräumarbeiten mit Fliessspuren an der angeströmten Fassade, welche die maximale Wirkungshöhe markieren. Die Fenster in der oberen Etage wurden nicht erreicht und sind unversehrt (Photograph unbekannt).....	121
Abbildung 73 : A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 1 mit Lüftungsschächten (rote Pfeile), Fenstern und B: einem seitlichem Eingang ins Untergeschoss.....	121
Abbildung 74: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 16. Die Anströmrichtung ist mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet.....	122
Abbildung 75: Schematische Darstellung der vorgeschlagenen Methode zur Vulnerabilitätsanalyse	124
Abbildung 76 : Kalibriertes Endergebnis der Ablagerungshöhen. Gebäude Nr. 1 aus Abbildung 49 ist zur besseren Orientierung markiert.	127
Abbildung 77: Kalibrierungsphoto mit stark mit Sediment überschüttetem Bereich vor Gebäude Nr.1, in welchem es in der Simulation zu keinen Ablagerungen kommt (Photo: Andreas Götz).	128
Abbildung 78: Gebäude Nr. 13 mit erhöhter Lage durch Mauerabsatz.....	130
Abbildung 79: Räumliche Verteilung der simulierten Fliessgeschwindigkeit > 1 m/s und < 1 m/s. Die dominante Anströmrichtung des Ereignisses ist mit einem blauen Pfeil markiert. Zwei Photos vom Ereignis in der Umgebung der Wohngebäude Nr. 8, 17 und 18 verifizieren den statischen Charakter der Überschwemmung im Simulationsergebnis. (Photos: Andreas Götz).	131
Abbildung 80: A: Enge Häuserzeilen im Alten Dorfteil in der Nähe des Kegelhalses. B: Lockerere Bauweise mit Wiesenstücken zwischen den Wohngebäuden im neueren Dorfteil mit einigem Abstand zum Kegelhals.	132
Abbildung 81: Wie in A und B ersichtlich, kann man beim $v \cdot h$ -Kriterium trotz unterschiedlichen Fliesstiefen und -geschwindigkeiten in beiden Fällen auf die gleiche Intensität kommen.....	135
Abbildung 82: Effektive Wirkungshöhe vs. Schadenempfindlichkeit mit den bezüglich des Streuverhaltens untersuchten Datenpunkten in rot markiert. Die Nummern beziehen sich auf die Wohngebäude in Abbildung 49.	138
Abbildung 83: Angeströmte Gebäudeseiten von Wohngebäude Nr. 6 (A) und Nr. 14 (B) im direkten Vergleich. Die entsprechende Schadenempfindlichkeit der beiden Gebäude ist jeweils in der weissen Textbox vermerkt.....	139
Abbildung 84: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 29.....	174
Abbildung 85: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 30.....	175
Abbildung 86: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 31.....	176

<i>Abbildung 87: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 32.....</i>	<i>177</i>
<i>Abbildung 88: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 33.....</i>	<i>178</i>
<i>Abbildung 89: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 34.....</i>	<i>179</i>
<i>Abbildung 90: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 35.....</i>	<i>180</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Intensitätsklassen schwach, mittel und stark gemäss Loat und Petraschek (1997).</i>	5
<i>Tabelle 2: Auflistung der Schadenempfindlichkeitswerte nach Borter (1999b) für Ein-/Zweifamilien- und Mehrfamilienhäuser.</i>	5
<i>Tabelle 3: Statistische Masszahlen für die Schadenempfindlichkeit gegenüber dynamischer Überschwemmung nach Romang (2004).</i>	6
<i>Tabelle 4: Statistische Werte der Schadenempfindlichkeit von ausgewählten Fallbeispielen des PLANAT-Projektes „Verletzlichkeit bei gravitativen Massenbewegungen“ (Spichtig und Bründl, 2008).</i>	9
<i>Tabelle 5: Zusammenfassung der behandelten Forschungsarbeiten. (Die Tabelle wird auf der folgenden Seite fortgesetzt).</i>	15
<i>Tabelle 6: Eigenschaften und Merkmale von Hochwasser und Murgangprozessen (ONR-24800, 2009)</i>	27
<i>Tabelle 7: Prozess-, Objekt- und Umgebungsparameter welche einen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit haben (Kimmerle (2002); für feststoffführende Überschwemmungen angepasst).</i>	49
<i>Tabelle 8: Verwendete Parameter zur Berechnung der für die Simulation verwendeten Sedimentganglinie. Q_{cmin} und S wurden von Badoux und Rickenmann (2008) übernommen.</i>	69
<i>Tabelle 9: Angaben zur abgelagerten Sedimentkubatur aus der Literatur.</i>	70
<i>Tabelle 10: Grenzfließgeschwindigkeiten für unterschiedliche Dichten des Wasser- Feststoffgemisches, welche bei einer Widerstandsfähigkeit von 10 kN/m^2 zum Bruch einer Fensterscheibe durch rein hydrodynamische Beanspruchung führen.</i>	80
<i>Tabelle 11: Grenzwassertiefen für unterschiedliche Dichten des Wasser- Feststoffgemisches, welche bei einer Widerstandsfähigkeit von 10 kN/m^2 zum Bruch einer Fensterscheibe durch rein statische Beanspruchung führen.</i>	80
<i>Tabelle 12: Berechnete kinetische Energien für Baumstämme mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern.</i>	83
<i>Tabelle 13: Übersicht über die Bestimmung der Werte der effektiven Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit als Intensitätskriterien. Die beiden schlussendlich für die anschliessende Klassierung verwendeten Werte sind gelb markiert.</i>	86
<i>Tabelle 14: Schwache, mittlere und starke Schadensintensität mit der Beschreibung des entstehenden Schadens und den Kriterien, welche zur Zuteilung in diese Klasse führen.</i>	89
<i>Tabelle 15: Beispiel eines Datensatzes wie er von der Mobiliar abgegeben wurde.</i>	91
<i>Tabelle 16: Bestimmte Intensitätswerte an der angeströmten Gebäudewand der 20 untersuchten Wohngebäude.</i>	99
<i>Tabelle 17: Verwendete Fliesstiefen und -geschwindigkeiten zur Berechnung des Intensitätskriteriums $v \cdot h$.</i>	101
<i>Tabelle 18: Intensitätsklassen und –kriterien für alle 20 untersuchten Wohngebäude.</i>	103
<i>Tabelle 19: Übersicht über die $v \cdot h$ – Werte und die jeweilige nach Loat und Petraschek (1997) zugeordnete Intensitätsklasse für alle untersuchten Wohngebäude in Baltschieder.</i>	104

<i>Tabelle 20: Übersicht über die Schadenempfindlichkeit für alle der 20 untersuchten Wohngebäude in Baltschieder.</i>	105
<i>Tabelle 21: Intensitätsklassen und korrespondierende Schadenempfindlichkeit für alle 20 untersuchten Gebäude.</i>	106
<i>Tabelle 22: Diverse Statistische Masszahlen für die auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit beruhenden Intensitätsklassen.</i>	108
<i>Tabelle 23: Intensitätsklasse mit korrespondierender Schadenempfindlichkeit aller 20 untersuchten Wohngebäude für das Intensitätskriterium v^*h.</i>	110
<i>Tabelle 24: Statistische Masszahlen für jede der 3 auf v^*h basierenden Intensitätsklassen.</i>	111
<i>Tabelle 25: Gegenüberstellung der Intensitätsklassen der beiden Klassierungssystemen mit unterschiedlichen Intensitätskriterien. Übereinstimmende Klassenzuordnungen sind in grün umrandet.</i>	114
<i>Tabelle 26: Gegenüberstellung der Fliessgeschwindigkeiten der Gebäude im Intensitätsintervall 0.5 m – 1 m effektiver Wirkungshöhe. S^* bezeichnet die einzelnen Schadenempfindlichkeitswerte der Gebäude, v die Fliessgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der maximalen effektiven Wirkungshöhe.</i>	140
<i>Tabelle 27: Simulationseinstellungen einer Auswahl von durchgeführten Simulationen. (Die Tabelle wird auf den folgenden zwei Seiten fortgesetzt).</i>	171
<i>Tabelle 28: Einstellungen der endgültigen für die weitere Analyse verwendete BASEMENT - Simulation.</i>	174
<i>Tabelle 29: Ausgangseinstellungen der Simulation zur Verdeutlichung der Sensitivität der endgültigen Ablagerungshöhen auf ausgewählte Simulationseinstellungen.</i>	174
<i>Tabelle 30: Variierte Transportformel (Mpm - multi) in rot markiert.</i>	174
<i>Tabelle 31: Variierter Transportfaktor (rot markiert).</i>	175
<i>Tabelle 32: Variierte Feststoffkubatur (rot markiert).</i>	176
<i>Tabelle 33: Variierter Anteil Geschiebe/Feinanteile (rot markiert).</i>	177
<i>Tabelle 34: Variierter Korndurchmesser D_{50} (rot markiert).</i>	178
<i>Tabelle 35: Variierter Korndurchmesser D_{fein} (rot markiert).</i>	179
<i>Tabelle 36: Gegenüberstellung der anhand von Kalibrierungsphotos abgeschätzten Ablagerungshöhe und der mit BASEMENT simulierten Ablagerungshöhe. Bei mit einem + markierte Differenzen ist die simulierte Ablagerungshöhe grösser als die abgeschätzte, bei einem – ist sie kleiner. (Photograph aller Photos unbekannt. Die Tabelle wird auf den folgenden zwei Seiten fortgesetzt).</i>	181

KAPITEL 1: EINLEITUNG

Im folgenden Kapitel wird zunächst eine kurze thematische Einbettung der vorliegenden Masterarbeit vorgenommen. Anschliessend wird der aktuelle Forschungsstand bezüglich physischer Gebäudevulnerabilität gegenüber feststoffführenden Überschwemmungen umrissen. In Kapitel 1.3 sind konkrete Problemstellungen herausgearbeitet, welche sich in diesem Zusammenhang ergeben. Im darauffolgenden Kapitel 1.4 sind die sich daraus entwickelnden Fragestellungen dieser Masterarbeit dargelegt. Die Einleitung wird schliesslich in Kapitel 1.5 durch eine kurze Übersicht über den weiteren Aufbau und die Gliederung dieser Masterarbeit abgeschlossen.



Titelbild von Kapitel 1: Einwirkung einer feststoffführenden Überschwemmung auf ein Wohngebäude im österreichischen Dorf Wartschensiedlung. Aus Fuchs et al. (2012).

1.1 Einbettung des Themas

Hochwasserprozesse in Gebirgsflüssen und Wildbächen fordern im Alpenraum und anderen Gebirgsketten auf der Erde immer wieder Todesopfer und verursachen beträchtliche Schäden an Gebäuden und Infrastruktur. Die an sich natürlich im Gebirge ablaufenden Prozesse werden dabei durch das Aufeinandertreffen mit dem menschlichen Wirkungsraum aus anthropozentrischer Sichtweise zur Naturgefahr (Alexander, 1993). Die zunehmenden Bevölkerungszahlen und die wirtschaftliche Entwicklung der jüngeren Vergangenheit führt vermehrt dazu, dass Land im Wirkungsbereich von solchen natürlich ablaufenden Prozessen für menschliche Aktivitäten überbaut wird und wurde (Nadim und Kjekstad, 2009). Die Überbauung von Schwemmfächern der Gebirgsflüsse und Wildbäche reiht sich dabei in diese Tendenz ein. Das Resultat dieser Bautätigkeit manifestiert sich schliesslich am Beispiel der Schweiz in der hohen Bebauungsdichte von bis zu 800 Gebäuden pro km² (Jaboyedoff und Bonnard, 2007), wie Abbildung 1 zeigt.

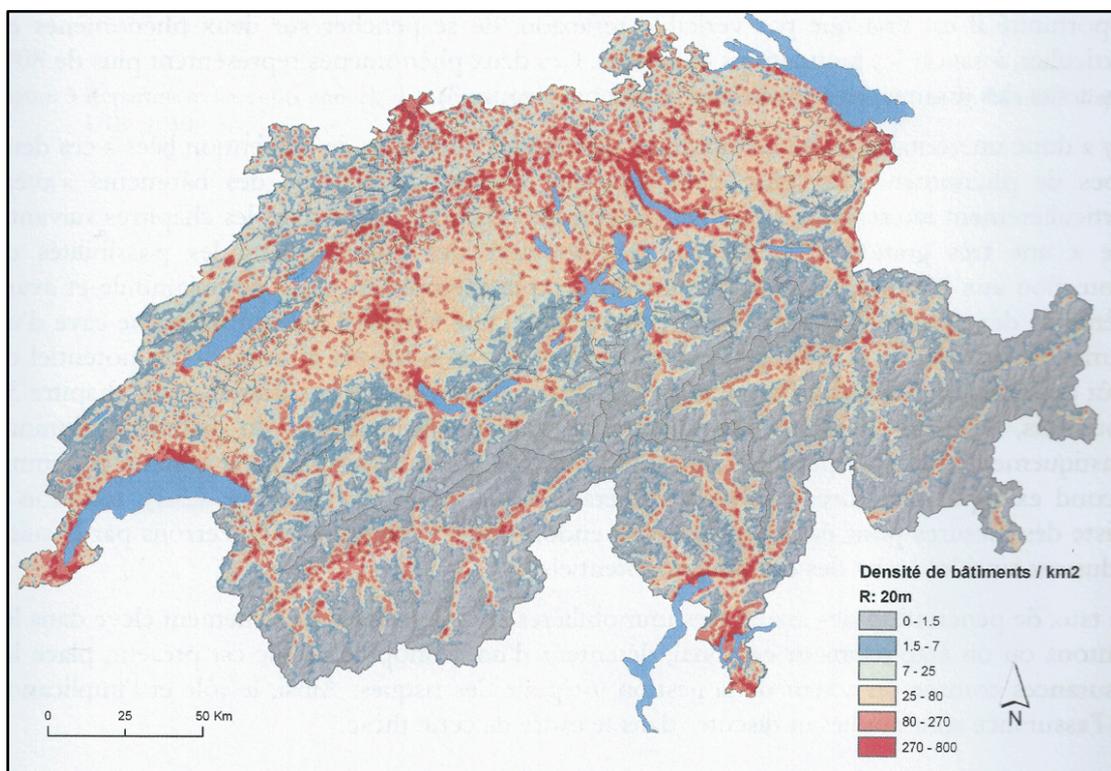


Abbildung 1 : Graphische Darstellung der Gebäudedichte pro Quadratkilometer in der Schweiz nach Jaboyedoff und Bonnard (2007).

Diese Entwicklung führt nicht nur zum Auftreten von Naturgefahren sondern auch zu einem Anstieg des Schadenpotentials und damit des Gesamtrisikos in Gebieten, welche potentiell von Überschwemmungen und weiteren Hochwasserprozessen betroffen sein können. Was dies im Ereignisfall bedeutet, zeigen vergangene Ereignisse. So führte beispielsweise das Hochwasser im Jahr 2000 in der Schweiz zu rund 710 Millionen CHF Schaden, wobei davon rund 70 % im Gebirgskanton Wallis entstanden (Badoux und Rickenmann, 2008). Besonders stark betroffen war die Gemeinde Baltschieder, wo der Baltschiederbach am 15. Oktober über seine Ufer trat und infolge Überschwemmung und Übersarung grosse Verwüstung im Dorf Baltschieder anrichtete. Durch die rechtzeitige Evakuierung der Bevölkerung führte das Ereignis glücklicherweise nur zu Sachschaden und es waren keine Todesopfer zu beklagen (Jäggi et al., 2004). Laut Hegg et al. (2002) entstand jedoch ein beträchtlicher finanzieller Schaden von 80 Millionen CHF. Insgesamt wurden durch das Ereignis rund 208 Gebäude beschädigt oder zerstört (Turowski et. al, 2008).

Derartige Ereignisse bilden die Grundlage für die empirische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Hochwasserprozessen und den Schäden, welche als deren Folge an Gebäuden und Infrastruktur entstehen. Daraus gewonnene Informationen sind unter dem Gesichtspunkt eines integralen Risikomanagements zentral, um in Zukunft sowohl Schäden als auch Risiken vermindern zu können (Totschnig et. al, 2011). Die Verminderung oder Konsolidierung der Risiken auf alpinen Schwemmfächern stellt im Zuge der oben beschriebenen sozio-ökonomischen Entwicklung in Gebirgsregionen mit dem zunehmenden Druck auf Bauland eine wichtige Herausforderung dar. Der Quantifizierung und dem besseren Verständnis der risikosteuernden Faktoren kommt als Schritt in diese Richtung ein wichtiger Stellenwert zu, da robuste Risikowerte beispielsweise zur Überwälzung auf (Rück-) Versicherer oder der möglichst kosteneffektiven Planung von Schutzmassnahmen gebraucht werden.

Ein verbessertes Verständnis von risikosteuernden Faktoren auf Objektstufe ist zudem ein wichtiger Baustein für eine risikobasierte Raumplanung und das naturgefarengerechte Bauen in Zukunft. Dies vor allem vor dem Hintergrund der beengten Platzverhältnissen in vielen Gebirgstälern, in welchen ausschliesslich auf Gefährdung basierende Bauverbotszonen in langfristiger Zukunft unter Umständen erschwert umsetzbar sein werden, wenn man eine weitere wirtschaftliche Entwicklung in diesen Regionen zulassen will.

Bei der Ermittlung des Risikos stellt die physische Vulnerabilität der exponierten Objekte (Gebäude, Infrastruktur) gegenüber dem Naturgefahrenprozess eine sehr wichtige, steuernde Grösse dar (Totschnig und Fuchs, 2012). Laut Papathoma-Köhle et al (2011) wird ein verbessertes Verständnis der Vulnerabilität zu einer grösseren Effizienz in der Risikobeurteilung, der Notfallplanung und der Vorbeugung vor Naturgefahren führen, was die Wichtigkeit der Vulnerabilität in Bezug auf das Risiko zusätzlich noch unterstreicht. Die physische Vulnerabilität wird dabei als Schadenempfindlichkeit eines definierten Schadenobjektes definiert, welche als Folge des Auftretens eines natürlichen Phänomens mit bestimmter Intensität resultiert (UNDRR, 1979). Die Schadenempfindlichkeit im ökonomischen Sinn meint in dieser Definition das Verhältnis der Schadenssumme und des Strukturwerts (Versicherungswert) (Borner, 1999a). Durch eine Verknüpfung der Schadenempfindlichkeit eines Gebäudes mit der Prozessintensität, welche zum Schaden geführt hat, können physische Vulnerabilitätswerte hergeleitet werden. Diese Vulnerabilitätswerte werden dann als wichtige Instrumente zur Risikoquantifizierung und Schadensvorhersage eingesetzt. Während derartige Vulnerabilitätswerte und -funktionen bei Erdbeben und Stürmen bereits eine breite Anwendung erfahren (Douglas, 2007), beschäftigt sich die Forschung erst seit relativ kurzer Zeit mit der Herleitung von physischen Vulnerabilitätswerten im alpinen Kontext im Zusammenhang mit Hochwasserprozessen.

Die vorliegende Masterarbeit knüpft an diese kurze Forschungsgeschichte an und untersucht das bereits angetönte Überschwemmungsereignis mit fluvialem Feststofftransport am 15. Oktober 2000 im Oberwalliser Dorf Baltschieder bezüglich der physischen Vulnerabilität von betroffenen Wohngebäuden.

1.2 Forschungsstand

Die Forschung in Bezug auf die physische Vulnerabilität von Schadenobjekten gegenüber feststoffführenden Überschwemmungen und anderen Wildbachprozessen ist noch relativ jung. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde dabei mehrheitlich versucht, die physische Vulnerabilität mit funktionalen und statistischen Zusammenhängen zwischen der Prozessintensität und der Schadenempfindlichkeit quantitativ zu beschreiben (Totschnig und Fuchs, 2013). Im Folgenden wird in chronologischer Reihenfolge auf die wichtigsten bis heute durchgeführten Forschungsarbeiten zum Thema der physischen Vulnerabilität gegenüber Hochwasserprozessen eingegangen:

Borter (1999a, 1999b) gab in seinem Methodenleitfaden für die Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren des BUWAL erstmals Schadenempfindlichkeitswerte in tabularer Form für dynamische Überschwemmungen an. Diese Werte wurden jeweils für die 3 Intensitätsklassen schwach, mittel und stark gemäss Loat und Petraschek (1997) (siehe Tabelle 1) in Form von Schätzungen für die Schadenobjekte Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, öffentliche Bauten, Gewerbe und Industrie gutachterlich festgelegt. Die publizierten Schadenempfindlichkeitswerte sind eher als eine erste Annäherung zu sehen. Borter (1999b) verweist ausdrücklich darauf, dass die angegebenen Werte auf Grund mangelnder Daten nicht auf empirischen Grundlagen beruhen und deshalb möglicherweise erheblich von der realen physischen Vulnerabilität abweichen können.

Tabelle 1: Intensitätsklassen schwach, mittel und stark gemäss Loat und Petraschek (1997).

Intensität	schwach	mittel	stark
$v \cdot h$ [m^2/s] (Überschwemmung)	< 0.5	0.5 - 2.0	> 2.0

Nachfolgend sind die von Borter (1999b) gemachten Angaben zur Schadenempfindlichkeit von Wohngebäuden gegenüber dem Prozess Überschwemmung aufgeführt (Tabelle 2). Borter (1999b) unterscheidet dabei zwischen der Schadenempfindlichkeit der Gebäudestruktur und des Gebäudeinhalts. Er differenziert jedoch nicht zwischen dynamischer und statischer Überschwemmung:

Tabelle 2: Auflistung der Schadenempfindlichkeitswerte nach Borter (1999b) für Ein-/Zweifamilien- und Mehrfamilienhäuser.

	Schwache Intensität	Mittlere Intensität	Starke Intensität	Schwache Intensität	Mittlere Intensität	Starke Intensität
	Schadenempfindlichkeit Struktur			Schadenempfindlichkeit Inhalt		
Ein-/Zweifamilienhaus	0.02	0.15	0.30	0.06	0.20	0.32
Mehrfamilienhaus	0.02	0.15	0.25	0.06	0.20	0.32

Eine erste Studie zur Herleitung von Vulnerabilitätswerten aufgrund von empirisch ausgewerteten Schadenereignissen verfasste Kimmerle (2002) im Rahmen seiner Diplomarbeit über die Schadenempfindlichkeit von Gebäuden gegenüber Wildbachgefahren. Er untersuchte dabei unter anderem die physische Vulnerabilität von insgesamt 111 Gebäuden welche durch dynamische Überschwemmungen von Wildbächen an 4 Standorten in der Schweiz betroffen waren. Als Intensitätskriterium verwendete er dabei das Produkt aus mittlerer Fliessgeschwindigkeit v und mittlerer Fliesshöhe h gemäss den in Tabelle 1 dargestellten Intensitätsklassen nach Loat und Petraschek (1997). Fliessgeschwindigkeit und Fliesshöhe sind mit Hilfe von Bildmaterial (Photos/Filmaufnahmen) und Befragungen ex post bestimmt worden. Die Schadendaten sowie der jeweilige Gebäudewert wurden durch professionelle Schätzer der Kantonalen Gebäudeversicherungen und der Mobiliar erhoben. Aufgrund der in Abbildung 2 ersichtlichen grossen Streuung der Daten verzichtete Kimmerle (2002) auf die Herleitung einer funktionalen Beziehung zwischen dem Intensitätskriterium $v \cdot h$ und der Schadenempfindlichkeit. Stattdessen berechnete er statistische Masszahlen wie Median oder Quantile zur Charakterisierung der physischen Vulnerabilität für jede der Intensitätsklassen schwach, mittel und stark.

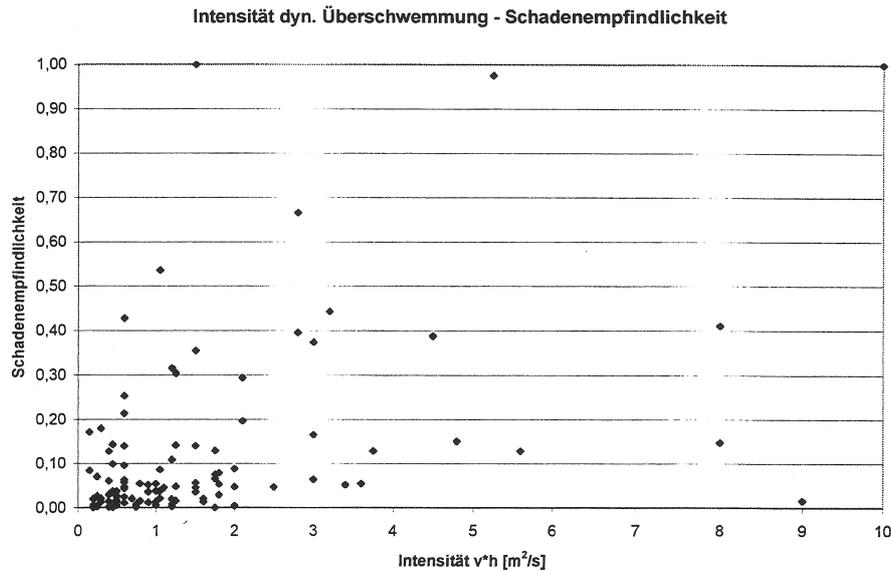


Abbildung 2: Intensität $v \cdot h$ vs. Schadenempfindlichkeit der 111 durch dynamische Überschwemmungen betroffene Gebäude (Kimmerle, 2002).

Romang (2004) veröffentlichte in seiner Dissertation die Ergebnisse von Kimmerle (2002) und führte eine weitere Fallstudie mit der gleichen Methodik im schweizerischen Reun durch, wo 25 Wohn- und Gewerbebauten durch einen sehr wasserreichen und schlammigen Murgang beschädigt wurden. Aufgrund der grossen Streuung der Daten leitete auch Romang (2004) keine Vulnerabilitätsfunktion her, sondern publizierte ebenfalls mittlere Schadenempfindlichkeitswerte für schwache, mittlere und starke Intensitäten von dynamischen Überschwemmungen gemäss Loat und Petraschek (1997) (Tabelle 3). Er verwendete dabei die Intensitätskriterien einer dynamischen Überschwemmung aufgrund des grossen Wasseranteils dieses Murgangs. Statistische Masszahlen für die Intensitätsklassen nach Loat und Petraschek (1997) zu berechnen, ist seither in allen in der Schweiz entstandenen Studien zur Norm geworden. Im Vergleich mit den Werten von Borter (1999b) konstatierte Romang (2004) dabei, dass die erhobenen Werte vor allem bei mittlerer Intensität von den Angaben Borters abweichen. Die von Romang (2004) hergeleiteten Schadenempfindlichkeitswerte sind bei mittlerer Intensität bedeutend geringer als diejenigen von Borter (1999b).

Tabelle 3: Statistische Masszahlen für die Schadenempfindlichkeit gegenüber dynamischer Überschwemmung nach Romang (2004).

	Kleinster Wert	10%-Quantil	Median	Mittelwert	90%-Quantil	Grösster Wert
Schwache Intensität	0.00	0.00	0.02	0.04	0.13	0.18
Mittlere Intensität	0.00	0.01	0.04	0.09	0.25	1.00
Starke Intensität	0.02	0.05	0.18	0.30	0.70	1.00

Die Erkenntnisse von Kimmerle (2002) und Romang (2004) wurden bei der Festlegung der Schadenempfindlichkeitswerte von EconoMe 2.0 (BAFU, 2010) mitberücksichtigt. EconoMe wird heute für Wirtschaftlichkeitsnachweise von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren in der schweizerischen Praxis eingesetzt.

Basierend auf 16 betroffenen Einfamilienhäusern leitete Fuchs et al. (2007) eine Vulnerabilitätsfunktion auf Grundlage eines Murgangereignisses in den österreichischen Alpen her. Der Versuch die Beziehung zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit durch eine Funktion auszudrücken wurde dabei in der Folge vor allem im österreichischen und italienischen Studien adaptiert. In der Publikation von Fuchs et al. (2007) wurde die Ablagerungshöhe als Proxy für die Intensität verwendet. Die Ablagerungshöhe ist direkt nach dem Ereignis im Feld erhoben und in 0.5 m Schritten klassiert worden. Der Gebäudewert wurde mit Hilfe von Fixpreisen pro m³ aufgrund des Gebäudevolumens für jedes der 16 Gebäude berechnet. Für die Bestimmung des Schadens stützte sich Fuchs et al. (2007) auf die Daten von professionellen Schadensschätzern, welche die Schadenwerte nach dem Ereignis auf Objektstufe erfassten. Aufgrund dieser Daten konnte eine Polynomfunktion zweiten Grades als Vulnerabilitätskurve gefittet und unter anderem mit Borters (1999b) Angaben verglichen werden (Abbildung 3):

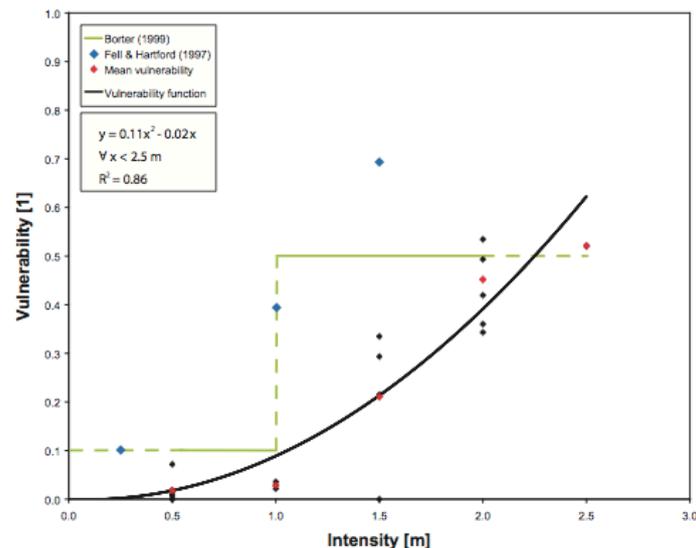


Abbildung 3: Vulnerabilitätsfunktion nach Fuchs et al. (2007).

Mit einem ähnlichen Ansatz analysierte Akbas et al. (2009) einen Murgang in Selvetta in den italienischen Alpen. Dabei flossen 13 beschädigte oder zerstörte Gebäude in die Studie mit ein. Die Ablagerungshöhe stellte den Parameter für die Intensität dar und wurde ebenfalls mit Hilfe von Feldarbeit direkt nach dem Ereignis erhoben. Zusätzlich dazu sind aber noch Interviews mit Dorfbewohnern und den Rettungsteams zur Rekonstruktion der Ablagerungshöhen durchgeführt worden. Die bestimmten Ablagerungshöhen sind dann analog zu Fuchs et al. (2007) in 0.5 m Schritten klassiert worden. Die Schadendaten wurden mit Hilfe von Schadenmeldungen von Ingenieuren des italienischen Bevölkerungsschutzes beschafft. Zur Bestimmung des Gebäudewertes sind erneut Standardpreise bezogen auf die Größe und Art des Gebäudes verwendet worden. Die hergeleitete und in Abbildung 4 dargestellte Vulnerabilitätsfunktion hatte eine ähnliche Form wie diejenige von Fuchs et al. (2007). Die von Akbas et al. (2009) hergeleiteten Vulnerabilitäten waren aber rund 35% höher (Totschnig und Fuchs, 2013).

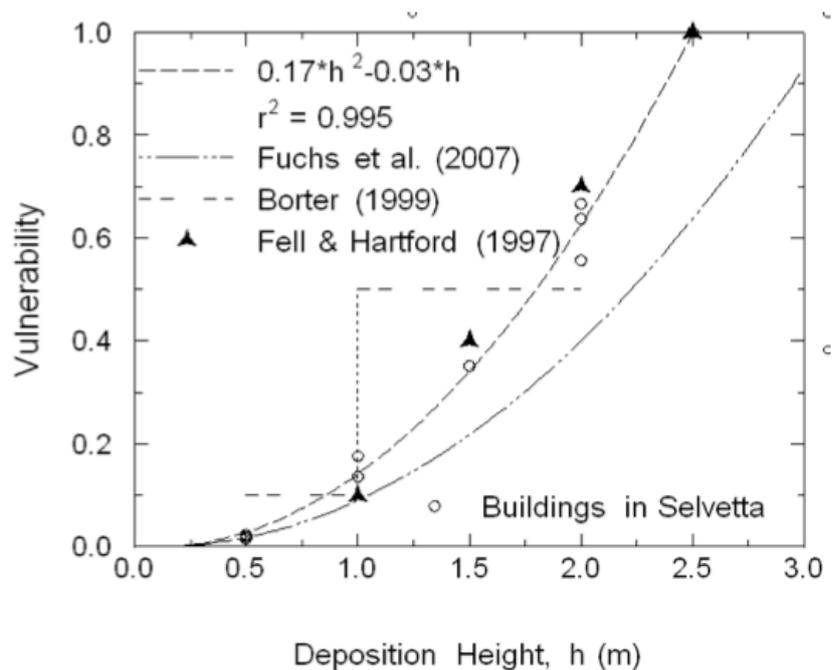


Abbildung 4: Beziehung zwischen Vulnerabilität und Ablagerungshöhe gemäss Akbas et al. (2009).

Die nationale Plattform Naturgefahren PLANAT analysierte die physische Vulnerabilität im Rahmen des Schlussberichtes zum Projekt "Verletzlichkeit bei gravitativen Naturgefahren" (Spichtig und Bründl, 2008). Die Untersuchung bezüglich dynamischer Überschwemmungen basiert auf 4 Fallbeispielen mit fluvialem Feststofftransport und Übersarungen in Bern, Klosters, Susch und Oey/Diemtigen. Weiter wurde im gleichen Bericht die physische Vulnerabilität von Gebäuden bezüglich Murgangereignissen in Davos und in Brienz untersucht. Die Schadendaten sind in allen Fällen von der kantonalen Gebäudeversicherung zur Verfügung gestellt worden. Die Intensitätswerte wurden anhand von Photos, Experteneinschätzungen, Ereignisanalysen und Intensitätskarten rekonstruiert. Die Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten wurden anschliessend einer der Intensitätsklassen schwach, mittel und stark gemäss Loat und Petraschek (1997) zugeordnet. Schlussendlich sind für jede Fallstudie und Intensitätsklasse statistische Parameter wie der Median, der Mittelwert, Minima und Maxima sowie die Schiefe der Verteilung angegeben und in einem Boxplot dargestellt worden. In der Tabelle 4 findet sich eine Übersicht über die gefundenen statistischen Werte der Schadenempfindlichkeit pro Intensitätsklasse. Insgesamt sind in den einzelnen Fallstudien 284 beschädigte oder zerstörte Gebäude bezüglich Ihrer physischen Vulnerabilität untersucht worden. Bei den Gebäuden handelte es sich hauptsächlich um Wohngebäude und vereinzelt um Ferienhäuser.

Tabelle 4: Statistische Werte der Schadenempfindlichkeit von ausgewählten Fallbeispielen des PLANAT-Projektes „Verletzlichkeit bei gravitativen Massenbewegungen“ (Spichtig und Bründl, 2008).

	<i>Schwache Intensität</i>					<i>Mittlere Intensität</i>					<i>Starke Intensität</i>				
	<i>Klosters</i>	<i>Susch</i>	<i>Brienz</i>	<i>Oey</i>	<i>Davos</i>	<i>Klosters</i>	<i>Susch</i>	<i>Brienz</i>	<i>Oey</i>	<i>Davos</i>	<i>Klosters</i>	<i>Susch</i>	<i>Brienz</i>	<i>Oey</i>	<i>Davos</i>
Anzahl Objekte	35	21	23	27	0	36	18	9	45	2	27	6	16	17	3
Minimum	0.00	0.003	0.01	0.00	-	0.01	0.003	0.17	0.00	0.01	0.01	0.04	0.08	0.10	0.08
Maximum	0.31	0.11	0.73	0.40	-	0.77	0.94	1.00	0.43	0.03	1.00	1.00	1.00	0.51	0.79
Median	0.05	0.04	0.11	0.04	-	0.12	0.03	0.38	0.12	-	0.18	0.26	1.00	0.28	-
Mittelwert	0.06	0.05	0.17	0.11	-	0.16	0.12	0.55	0.16	0.02	0.24	0.44	0.82	0.26	0.35
Schiefe	0.42	0.33	1.63	1.02	-	1.97	2.38	0.41	0.63	-	0.52	-	-1.22	0.29	-

Totschnig et al. (2011) integrierten in ihre Studie 3 Ereignisse mit geschiefbeführenden Hochwasserprozessen aus den österreichischen Alpen. Im Gegensatz zu früheren Studien wurden hier auch Übersarungen als Prozess für die Vulnerabilitätsanalyse berücksichtigt. Insgesamt sind die Schadenempfindlichkeiten von 67 betroffenen Wohngebäuden auf 3 verschiedenen Schwemmfächern verwendet worden. Sowohl der Gebäudewert als auch der Schaden auf Objektniveau wurden dabei mit Hilfe von Fixpreisen und Schadenschätzern bestimmt.

Als Intensitätskriterium wurden die Ablagerungshöhen aus der Ereignisdokumentation der österreichischen Dienststelle Wildbach- und Lawinenverbau (WLV) verwendet. Neben der absoluten Ablagerungshöhe führt Totschnig et al. (2011) mit der relativen Ablagerungshöhe einen abgeleiteten Intensitätsparameter ein. Die relative Ablagerungshöhe ist dabei jeweils als Quotient aus Ablagerungshöhe und Gebäudehöhe berechnet worden (Formel 1), um dem Einfluss der Gebäudehöhe (Anzahl Stockwerke) auf die Schadenempfindlichkeit gerecht zu werden.

$$I_r = \frac{I}{H} \quad (1)$$

mit

I_r	Relative Intensität	[]
I	Absolute Intensität	[m]
H	Gebäudehöhe	[m]

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse passten Totschnig et al. (2011) schliesslich modifizierte Weibull-, Exponential-, Frechet- und Log-Funktionen auf die bestimmten Intensitäts-Schadenempfindlichkeitsdaten an. Die Frechetfunktion (Abbildung 5) bildete dabei die Daten mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.958 am besten ab. Bei allen an die Daten angepassten Funktionen zeigt sich eine erhebliche Streuung im Bereich von 1 m – 1.5 m absoluter Intensität (Ablagerungshöhe). Totschnig et al. (2011) führen diese Streuung auf den Umstand zurück, dass viele Fenster in dieser Höhe platziert sind und das Vorhandensein eines Fensters durch das somit potentiell mögliche Eindringen von Geschiebematerial ins Gebäudeinnere einen entscheidenden Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit nimmt.

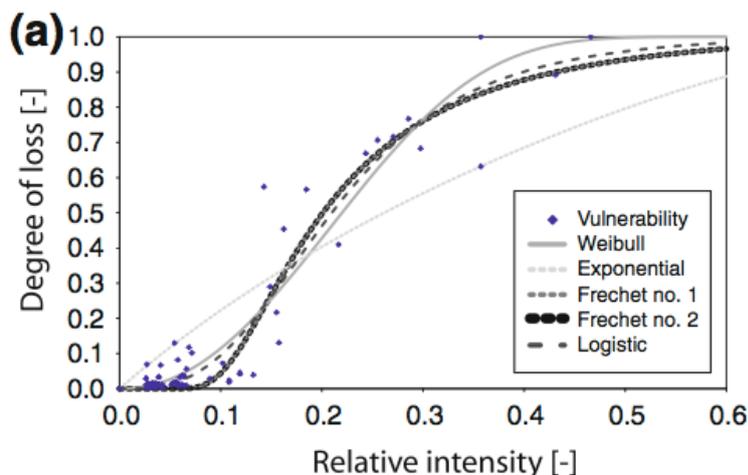


Abbildung 5: Vulnerabilitätsfunktionen für geschiefbeführende Hochwasser nach Totschnig et al. (2011). Die Frechet Funktion no.2 mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten ist im Diagramm fett dargestellt.

Als Novum in der Vulnerabilitätsforschung verwendeten Quan Luna et al. (2011) die ex-post Simulation eines Ereignisses mit Hilfe von FLO-2D als Murgangmodell zur Intensitätsrekonstruktion. Dieser methodische Ansatz ermöglichte neben der in den bisherigen Studien verwendeten Ablagerungshöhe auch die Bestimmung von weiteren Intensitätsparametern. Quan Luna et al. (2011) bezogen sich dabei auf das bereits von Akbas et al. (2009) untersuchte Murgangereignis in Selvetta in Italien und korrelieren die dort für 13 Gebäude bestimmten Schadenempfindlichkeiten mit der nachsimulierten Ablagerungshöhe [m], dem Produkt aus Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe [m^2/s] und dem Anpralldruck [kPa]. Um von in sich konsistenten Intensitätsparametern ausgehen zu können, wurden die Simulationsergebnisse jeweils an den von Akbas et. al (2009) im Feld erhobenen Ablagerungshöhen kalibriert. Für den Korrelation des jeweiligen Intensitätsparameters mit der Schadenempfindlichkeit wurden Log-Funktionen verwendet, wobei alle drei Intensitätsparameter zu sehr hohen (0.98-0.99) Korrelationskoeffizienten führten.

Papathoma-Köhle et al. (2012a) präsentieren mit ihrer Studie im italienischen Martell ausserdem als weitere Neuerung eine Methode zur Bestimmung der Vulnerabilitätsparameter Ablagerungshöhe, Schaden und Gebäudewert auf Grundlage von Photos. Dieses Vorgehen soll es ermöglichen, auch für Ereignisse bei denen keine Feldaufnahmen nach dem Ereignis durchgeführt wurden oder Versicherungsdaten fehlen, die nötigen Intensitäts-, Schaden- und Gebäudewerte ex-post erheben zu können.

Für die Studie wurden insgesamt 51 Gebäude, welche von einem Murgangereignis im Jahr 1987 betroffen waren, mit einbezogen. Als Intensitätsparameter ist für jedes der Gebäude die jeweilige Ablagerungshöhe anhand von nach dem Ereignis aufgenommenen Photos bestimmt worden. Man ging dabei nach Kaswalder (2009) von einer durchschnittlichen Raumhöhe von 2.60 m als Referenz aus.

Durch die auf dem Bildmaterial identifizierte Einwirkung des Prozesses auf das jeweilige Gebäude wurden Schadenwerte mit Hilfe von Fixpreisen pro Quadratmeter für Reparaturarbeiten geschätzt. Der Gebäudewert wurde ebenfalls mit Hilfe der vorliegenden Photos mit Standardpreisen pro Quadratmeter der Gemeinde Martell eruiert.

Für die resultierende Vulnerabilitätskurve ist eine Weibullfunktion gewählt worden, welche die Datenpunkte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.898 gut abbildete. Auch der Vergleich der auf Photodokumentation basierenden Kurve mit der Kurve, welche auf Grundlage von vorhandenen Schadenkompensationszahlungen auf Objektebene für das gleiche Ereignis erstellt wurde (Validation Curve), ist relativ konsistent (Abbildung 6). Das auf Schätzungen anhand von Photos beruhende Verfahren scheint also zu vergleichbaren Ergebnissen zu führen.

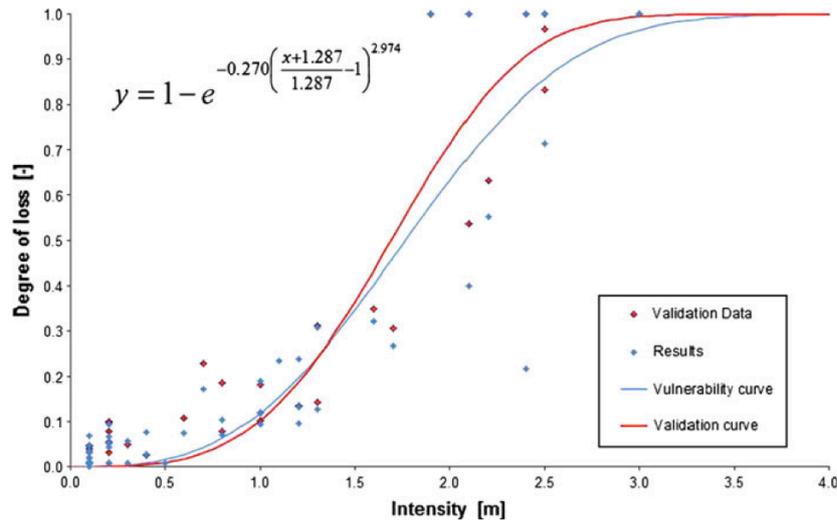


Abbildung 6: Vulnerabilitätskurve (blau) für 51 Gebäude und die Validationskurve (rot), welche auf Schadenkompensationszahlungen für 34 Gebäude beruht (Papathoma-Köhle et al., 2012a).

In ihrem Paper verglichen Totschnig und Fuchs (2012) die von Totschnig et al. (2011) in Österreich erstellten Vulnerabilitätskurven von Wohngebäuden gegenüber feststoffführenden Überschwemmungen mit einer im Rahmen der Studie erstellten Vulnerabilitätsbeziehung von Wohngebäuden gegenüber Murgängen. Aufgrund der in Abbildung 7 dargestellten ähnlichen Kurvenverläufe kamen Totschnig und Fuchs (2012) zum Schluss, dass eine Prozessunterscheidung zwischen Murgängen und feststoffführenden Überschwemmungen bei Analysen der physischen Vulnerabilität nicht notwendig seien.

Für die Erstellung der Vulnerabilitätsfunktion gegenüber Murgängen griff Totschnig und Fuchs (2012) dabei auf die von Akbas et al. (2009) erhobenen Daten des Ereignisses in Selvetta in Italien zurück. Ausserdem wurde der Datensatz mit Schadendaten von insgesamt 26 beschädigten Wohngebäuden auf dem Schwemmkegel des Wartschenbachs in Österreich angereichert. Insgesamt fanden so 39 Wohngebäude Eingang in die Murgang – Vulnerabilitätskurve.

Als Intensitätsparameter diente erneut die Ablagerungshöhe des Geschiebes, welche durch Feldarbeit für einzelne Gebäude nach dem Ereignis erhoben wurde. Die punktuell aufgenommenen Ablagerungshöhen wurden dann flächig über das Schadengebiet extrapoliert. Die Weibullfunktion zeigte beim Fit der Daten das höchste Bestimmtheitsmass. Zur Quantifizierung des entstandenen Schadens auf Einzelobjektenebene sind Daten der Länder und der Gemeinde sowie der Gebietsbauleitungen der österreichischen Dienststelle für Wildbach und Lawinverbauung (WLV) verwendet worden. Für die Berechnung der Gebäudewerte wurde von Einheitspreisen/m² für verschiedene Nutzungsarten wie Wohnbereich, Keller, Garage und Dach ausgegangen.

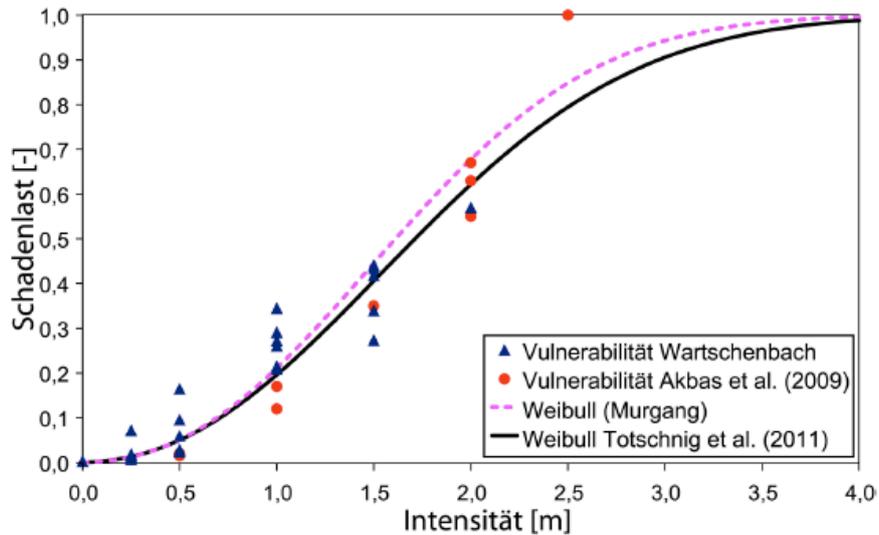


Abbildung 7: Vergleich der Vulnerabilitätskurven für fluviatilen Feststofftransport und Murgänge auf Grundlage von Daten aus der Studie von Akbas et al. (2009) (rote Punkte) und dem Ereignis am Wartschenbach (blaue Dreiecke) (Totschnig und Fuchs, 2012).

Totschnig und Fuchs (2013) publizierten hinsichtlich der betroffenen Risikoelemente bisher die umfangreichste Studie zum Thema der physischen Vulnerabilität in Zusammenhang mit Wildbach und Gebirgsflussprozessen. Erstmals wurde dabei der Gebäudetyp der Touristenunterkünfte in einer Vulnerabilitätsanalyse eingeführt. Insgesamt sind Daten von 7 Ereignissen von 6 verschiedenen Einzugsgebieten in den italienischen und österreichischen Alpen verwendet worden. 2 Ereignisse wurden dabei als Murgang charakterisiert. Bei allen anderen handelte es sich um feststoffführende Überschwemmungen. 93 Einfamilienhäuser und 53 Touristenunterkünfte fanden Eingang in die Studie und wurden in einer Vulnerabilitätskurve verarbeitet. Totschnig und Fuchs (2013) legitimierten die Zusammenlegung von Schadendaten unterschiedlicher Prozessarten und Gebäudetypen zur Erstellung einer Vulnerabilitätskurve, indem sie nachwiesen, dass es keine signifikanten Unterschiede bezüglich Vulnerabilität dieser verschiedenen Kategorien gibt. Dies bestätigt hinsichtlich der unterschiedlichen Prozessarten die von Totschnig et al. (2012) bereits 2012 veröffentlichten Untersuchungsergebnisse.

Als Intensitätsparameter wurde einmal mehr die Ablagerungshöhe gewählt, wobei diese in Feldarbeit nach dem Ereignis dokumentiert oder aufgrund von Photos rekonstruiert wurde. Für Gebäude bei denen die Ablagerungshöhe im Feld nicht erhoben wurde oder zu denen kein Bildmaterial vorhanden war, wurde eine natural neighbour – Interpolation der vorhandenen Daten in einer GIS-Umgebung durchgeführt. Analog zu Totschnig et al. (2011) ist erneut eine relative Ablagerungshöhe bezogen auf die Gebäudehöhe als Intensitätsparameter bestimmt worden.

Der Gebäudeschaden auf Objektstufe ist durch die professionellen Schätzungen nach dem Ereignis in die Studie eingeflossen und konnte jeweils auf Bundeslandebene beschafft werden. Als Grundlage für die Bestimmung des Gebäudewertes wurde von Fixpreisen/m² in Abhängigkeit vom Gebäudezustand, Gebäudetyp (Einfamilienhaus und Touristenunterkunft) und Wohnraumtyp (Wohnraum, Erdgeschoss, Attika) ausgegangen.

Als Funktion für den Fit der Datenpunkte ist, wie in Abbildung 8 gezeigt, eine Weibullfunktion gewählt worden, welche ein Bestimmtheitsmass von 0.908 aufwies. Die so hergeleitete Vulnerabilitätsfunktion ist anschliessend anhand von Daten von 34 von einem Murgang betroffenen Einfamilienhäusern aus einer Fallstudie im italienischen Martell validiert worden. Totschnig und Fuchs (2013) wiesen dabei nach, dass es keinen signifikanten Unterschied in den Vulnerabilitäten italienischer und österreichischer Einfamilienhäuser gibt.

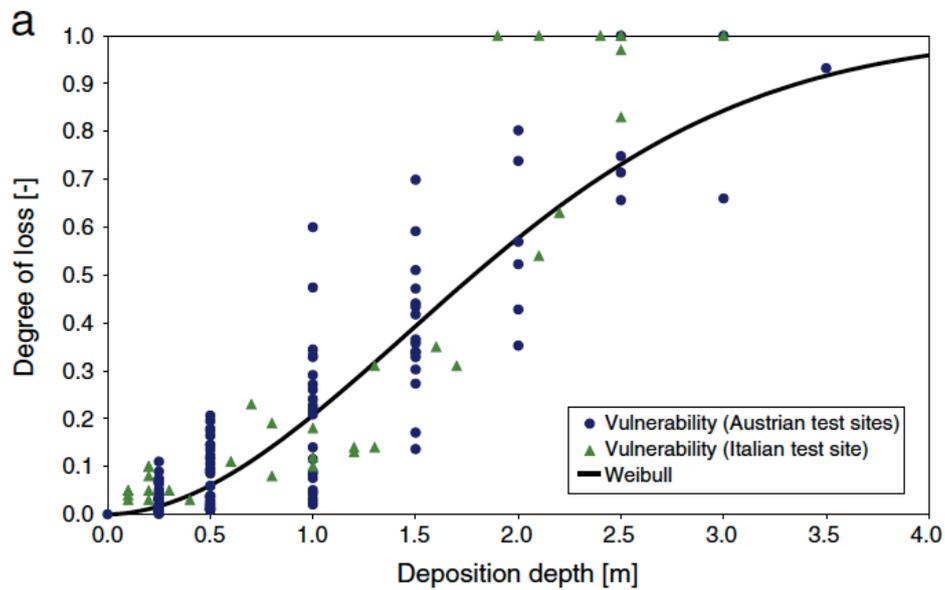


Abbildung 8: Vulnerabilitätsfunktion nach Totschnig und Fuchs (2013) mit den zur Herleitung der Funktion verwendeten Daten (blaue Punkte) und den für die Validierung verwendeten Daten aus der italienischen Studie (grüne Dreiecke).

Zusammenfassend können aufgrund der kurzen, bisherigen Forschungsgeschichte grundsätzlich zwei Paradigmen bei der physischen Vulnerabilitätsanalyse unterschieden werden: So wird in österreichischen und italienischen Studien versucht die Beziehung zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit durch Funktionen und Vulnerabilitätskurven auszudrücken, wobei hauptsächlich das Intensitätskriterium der Ablagerungshöhe verwendet wird. In den schweizerischen Studien wird der Fokus derweil mehr auf die Bestimmung von statistischen Werten wie den Median oder Mittelwert von Schadenempfindlichkeiten für die jeweiligen Intensitätsklassen schwach, mittel und stark nach Loat und Petraschek (1997) gelegt. In Tabelle 5 findet sich eine Zusammenfassung der behandelten Forschungsarbeiten, um einen Überblick über den momentanen Forschungsstand zu geben:

Tabelle 5: Zusammenfassung der behandelten Forschungsarbeiten. (Die Tabelle wird auf der folgenden Seite fortgesetzt).

Autor	Lokalität der Studie	Prozess	Verwendeter Intensitätsparameter	Anzahl untersuchte Gebäude	Gebäudetyp	Quelle Schaden-daten	Quelle Prozessintensität
Borter (1999)	Schweiz	u.A. Überschwemmung	$v \cdot h$ [m^2/s]	- (nicht empirisch)	Einfamilienhaus Mehrfamilienhaus Öffentliche Buaten Gewerbe, Industrie	- (nicht empirisch)	- (nicht empirisch)
Kimmerle (2002)	Schweiz	u.A. Dynamische Überschwemmung	$v \cdot h$ [m^2/s]	111	Wohngebäude Industrie/Gewerbe Landwirtschaft	Gebäudeversicherungen	Bildmaterial Augenzeugen
Romang (2004)	Schweiz	Murgang (sehr wasserreich)	$v \cdot h$ [m^2/s]	25	Wohngebäude Gewerbegebäude	Gebäudeversicherungen	Bildmaterial Augenzeugen Feldaufnahmen
Fuchs et al. (2007)	Österreich	Murgang	Ablagerungshöhe [m]	16	Einfamilienhaus	Staatlicher Katastrophenfonds	Feldaufnahmen
Spichtig und Bründl (2008)	Schweiz	Dynamische Überschwemmung / Übersarung / Murgang	$v \cdot h$ [m^2/s] Ablagerungshöhe [m]	284*	Mehrheitlich Wohngebäude. Vereinzelt Ferienhäuser	Gebäudeversicherungen	Bildmaterial Ereignisanalysen Intensitätskarten
Akbas et al. (2009)	Italien	Murgang	Ablagerungshöhe [m]	13	Keine Angabe	Protokolle Bevölkerungsschutz	Feldaufnahmen Augenzeugen
Totschnig et al. (2011)	Österreich	feststoffführende Überschwemmung	Ablagerungshöhe [m] Absolut und relativ	67	Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhaus)	Schadenschätzer der Bundesländer	Ereignisdokumentation
Quan Luna et al. (2011)	Italien	Murgang	Ablagerungshöhe [m] $v \cdot h$ [m^2/s] Aufpralldruck [kPA]	13	Keine Angabe	Staatlicher Katastrophenfonds	Feldaufnahmen Simulation

Autor	Lokalität der Studie	Prozess	Verwendeter Intensitätsparameter	Anzahl untersuchte Gebäude	Gebäudetyp	Quelle Schadendaten	Quelle Prozessintensität
Papa-thoma-Köhle et. al. (2012a)	Italien	Murgang	Ablagerungshöhe [m]	51	Keine Angabe	Photos, Fixpreise für Reperatur Validierung: Auszahlungen Katastrophenfonds	Bildmaterial
Totschnig und Fuchs (2012)	Österreich Italien	Murgang	Ablagerungshöhe [m]	39**	Wohngebäude	Dienststelle Wildbach und Lawinerverbauung (WLV) / Gemeinde / Bundesland	Feldaufnahmen Augenzeugen
Totschnig und Fuchs (2013)	Österreich Italien (Validierung)	Murgang / feststoffführende Überschwemmung	Ablagerungshöhe [m]	146	Wohngebäude Touristenunterkünfte	Schadenschätzer Bundesland	Bildmaterial Feldaufnahmen

* Klosters: 98 Gebäude, Susch: 45 Gebäude, Brienz: 48 Gebäude, Davos: 4 Gebäude, Oey: 89 Gebäude

** nur Gebäude welche zur Generierung der neuen Murgang - Vulnerabilitätskurve verwendet wurden davon 13 Gebäude aus der Studie von Akbas et al. (2009).

1.3 Problemstellung

Eine der Hauptlimitationen bei der Herleitung von Vulnerabilitätswerten und -beziehungen im Zusammenhang mit Wildbach und Gebirgsflussprozessen sind die jeweils nur in begrenzter Menge zur Verfügung stehenden Schadendaten (Quan Luna et al., 2011; Papathoma-Köhle et al., 2012b). So leiteten beispielsweise Akbas et al. (2009) und Quan Luna et al. (2011) ihre Vulnerabilitätsfunktionen gegenüber Murgängen basierend auf nur 13 betroffenen Gebäuden her, währenddem Fuchs et al. (2007) für ihre Funktion nur 16 Schadenfälle analysierten. Die Vulnerabilitätsanalyse welche bis dato auf der grössten Anzahl von Schadenfällen beruht, ist diejenige von Totschnig und Fuchs (2013) mit 146 Objekten in Italien und Österreich. In Anbetracht von quantitativ derart limitierten Stichproben kann davon ausgegangen werden, dass die gefundenen Ergebnisse zwingend mit weiteren Fallstudien validiert und die Datengrundlage somit vergrössert werden muss, um in Zukunft robustere, empirische Vulnerabilitätswerte zu erhalten (Totschnig und Fuchs, 2013).

Die Ursache für das Problem der begrenzten Datenmenge liegt mitunter in den Prozesseigenschaften der Überschwemmungen von Gebirgsflüssen und Wildbächen. Im Gegensatz zu Erdbeben oder Stürmen sind die Prozesse räumlich nämlich auf ein kleineres Gebiet konzentriert, was dazu führt, dass pro Einzelereignis weniger Gebäude betroffen sind und dementsprechend per se weniger Schadendaten für die Herleitung von Vulnerabilitätsbeziehungen anhand von Fallstudien zur Verfügung stehen (Douglas, 2007). Ausserdem ist der Zugang zu den Schadendaten bei Versicherungen im Fall der Schweiz aus Datenschutzgründen ebenfalls erschwert (Spichtig und Bründl, 2008).

In Ländern ohne Versicherungsprodukte für die Deckung von Schäden durch Naturgefahren sind oft auch gar keine detaillierten Schadendaten verfügbar. Aus diesem Grund muss der monetäre Schaden mitunter auch aufgrund von Photos und Befragungen mit Hilfe von Fixpreisen pro m^2 oder m^3 im Nachhinein rekonstruiert werden. Dieses Vorgehen kann zu Ungenauigkeiten in der Schadenempfindlichkeit führen. Zum Beispiel müssen für das Gebäudeinnere oder die Gebäudestruktur oft Annahmen getroffen werden, da entsprechende Photos fehlen. Derartige Annahmen erhöhen die Unsicherheiten und stellen somit eine mögliche Quelle von Unschärfe in Vulnerabilitätsanalysen dar (Papathoma-Köhle, 2012b).

Neben den nur limitiert vorhandenen oder erschwert zu beschaffenden Schadendaten besteht mit der Rekonstruktion der Prozessintensität von feststoffführenden Überschwemmungen eine weitere Schwierigkeit bei der Erarbeitung von Vulnerabilitätswerten. In den meisten Studien (Tsao et al., 2010; Papathoma-Köhle et al., 2012b; Totschnig und Fuchs, 2013) wurden die Ablagerungshöhen am Ende des Ereignisses als Proxy für die Intensität ex-post anhand von Photos und Ereignisdokumentationen rekonstruiert. Die Ablagerungshöhe bietet sich dabei insofern an, als dass sie relativ einfach nach einem Ereignis mit Photos oder Feldaufnahmen bestimmt werden kann. Dies führt aber bei fehlenden oder ungenauen Dokumentationen und Bildmaterial zu einer lückenhaften, unpräzisen Rekonstruktion der Intensität und somit zu einer Verfälschung der Vulnerabilitätsfunktion.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei der Verwendung der Ablagerungshöhe stellt die Extrapolation der an einzelnen Punkten vorhandenen Intensitätsinformationen (Photos, Befragung, Dokumentation) in angrenzende Bereiche dar. Ausserdem müssen die meist verwendeten finalen Ablagerungshöhen nicht zwingend für den Hauptteil der entstandenen Schäden verantwortlich sein, denn die Ablagerungshöhe ist eine dynamische Grösse, welche sich während des Ereignisses durch Erosion und Sedimentation ständig verändert. Einzig Quan Luna et al. (2011) tragen in ihrer Studie dieser Dynamik Rechnung und leiten aus Maximal- und Minimalwerten gemittelte Ablagerungshöhen während des Ereignisses her.

Des Weiteren vernachlässigt das häufig verwendete Intensitätskriterium Ablagerungshöhe gemäss Totschnig und Fuchs (2012) aber auch den Einfluss von weiteren Prozessmerkmalen wie Fließgeschwindigkeit oder Druckphänomene auf die Gebäudestruktur. Neben der Ablagerungshöhe sollten Intensitätsparameter wie etwa die Fließgeschwindigkeit, welche dynamische Prozesse charakterisiert, deshalb ebenfalls berücksichtigt werden, da sie nach Papathoma-Köhle et al. (2012b) ebenfalls eine wichtige Rolle für die Vulnerabilität eines Gebäudes spielen. Die resultierende Schadenempfindlichkeit eines Gebäudes wird nämlich nicht ausschliesslich durch die Ablagerungshöhe gesteuert und mit Fokus auf die Gebäudehülle hat sie vergleichsweise eher einen geringeren Einfluss. Beim Blick auf die vorhandene Literatur zeigt sich hier jedoch, dass einzig Kimmerle (2002), Romang (2004), zum Teil Spichtig und Bründl (2008) und Quan Luna et al. (2011) Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe für ihre Studien verwenden.

Dabei wird in den Publikationen von Kimmerle (2002), Romang (2004) und Spichtig und Bründl (2008) jeweils das Produkt aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit gebildet und den Intensitätsklassen schwach, mittel und stark nach Loat und Petraschek (1997) zugeordnet. Die zeitgleich während des Ereignisses wirkende maximale Fliesstiefe und -geschwindigkeit im Nachhinein allein durch Bildmaterial und Augenzeugenberichte zu bestimmen, stellt eine weitere Schwierigkeit dar.

Ausserdem liegt dem Intensitätskriterium Fließgeschwindigkeit * Wassertiefe, wie in Kapitel 3.2.2.1 dargelegt, hauptsächlich die Stabilitätsbetrachtung einer in der Wasserströmung stehenden Person zu Grunde. Das Intensitätskriterium $v \cdot h$ beruht also hauptsächlich auf der Gefährdung des Menschen und nicht primär auf der Schadenentstehung am Gebäude. Die schadenbringende Einwirkung auf das Gebäude stand verständlicherweise nicht ausschliesslich im Zentrum der Überlegungen des BUWAL bei der Definition des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ für dynamische Überschwemmungen. Aus diesem Grund widerspiegeln die Klassengrenzen der schwachen, mittleren und starken Intensität auch nicht entsprechende Schwellenwerte für die Zunahme des Schadens am Gebäude. Dieser Umstand bemängelt auch Choffet (2013) und hält fest, dass die Intensitätskriterien nach Loat und Petraschek (1997) nicht für die Bedürfnisse von Vulnerabilitätsanalysen ausgerichtet sind.

Ein auf Ablagerungshöhe, Fliesstiefe, und -geschwindigkeit basierendes Intensitätskriterium, welches ebenfalls die physikalisch, hydraulische Einwirkung von dynamischen, feststoffführenden Überschwemmungen auf Schadenobjekte berücksichtigt, wäre in der Schweiz jedoch ein wichtiger Baustein für die verbesserte Quantifizierung von Risiken. Wie bereits erwähnt, wird gemäss Loat und Petraschek (1997) das massgebende Intensitätskriterium als Produkt der Fliesstiefe und -geschwindigkeit definiert. Bei der schweizweit obligatorischen Erarbeitung von Gefahrenkarten auf kommunaler Ebene werden die Parameter wie Fliesstiefe und -geschwindigkeit zur Generierung des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ [m^2/s] für die Zuteilung der Gefahrenstufe bei dynamischen Überschwemmungen verwendet. In Abbildung 9 ist das in der Schweiz verwendete Intensitäts-Wahrscheinlichkeitsdiagramm für die Zuordnung zur entsprechenden Gefahrenstufe für dynamische Überschwemmungen und andere Gefahrenprozesse dargestellt. Die Definition der Intensität bei dynamischen Überschwemmungen erfolgt dabei auf Grundlage der in Tabelle 1 nach Loat und Petraschek (1997) aufgeführten Intensitätswerten mit dem Kriterium $v \cdot h$ für Szenarien mit einer Wiederkehrperiode von 30, 100 und 300 Jahren. Die Fliesstiefe (h) und -geschwindigkeit (v) werden dabei heute in der Praxis meist mit Hilfe von numerischer Simulationssoftware über das ganze Überschwemmungsereignis für zukünftige Szenarien (30, 100 und 300 Jahre) parzellenscharf bestimmt. Übersarungen und Ablagerungshöhen können analog dazu ebenfalls mit Simulationssoftware bestimmt werden.

Mit robusten auf die zeitgleich maximale Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit basierenden physischen Vulnerabilitätswerten wäre dies eine flächendeckend vorhandene Datengrundlage (Intensitätskarten) für die Risikoquantifizierung gegenüber zukünftigen in der Gefahrenkarte angenommenen Szenarien.

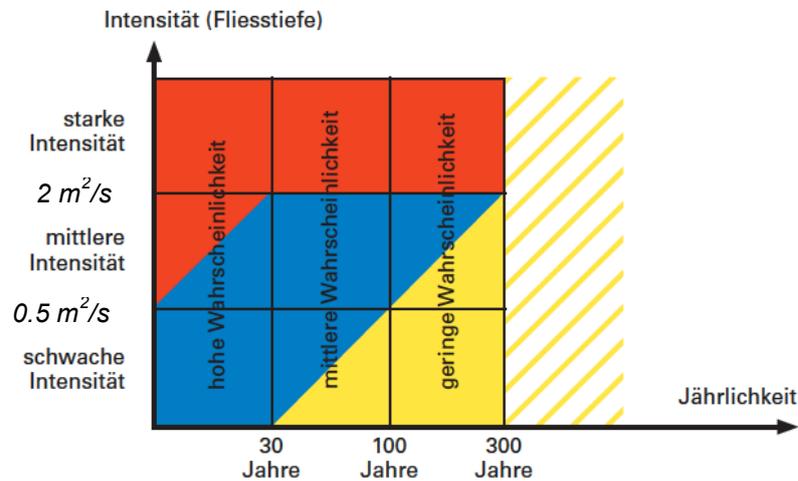


Abbildung 9: Intensitäts-Wahrscheinlichkeitsdiagramm mit der Definition erheblicher Gefährdung (rot), mittlerer Gefährdung (blau), geringer Gefährdung (gelb) und Restgefährdung (gelb-weiss schraffiert). Abgeändert nach Kämpf (2011).

Die numerische ex-post Bestimmung der Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit nach einem Ereignis im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse wurde bisher nur von Quan Luna et al. (2011) durchgeführt. Es wäre deshalb sicherlich förderlich das methodische Wissen über die Anwendung von numerischer Simulationssoftware bei der Vulnerabilitätsanalyse zu vertiefen und diesbezüglich eine weitere Methodik auszuarbeiten. Mit Hilfe von numerischen 2D – Simulationen könnte so in zukünftigen Studien auch bei fehlenden Messwerten aus Feldaufnahmen die Intensitätsgrundlage für Vulnerabilitätsanalysen flächendeckend bereitgestellt werden. Der Intensitätswert der Fließgeschwindigkeit fehlt nämlich im bewohnten Gebiet meist gänzlich, da er anhand von Bilddokumentationen kaum rekonstruierbar ist. Messgeräte zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit befinden sich derweil praktisch immer im Gerinne selbst und nicht in der Nähe der betroffenen Schadenobjekte.

Soweit zusammengefasst ist der Mangel an Daten sowohl in Bezug auf den Schaden als auch auf die Prozessintensitäten nach Holub et al. (2012) dafür mitverantwortlich, dass bis heute im alpinen Raum weder eine als robust verifizierte Vulnerabilitätsfunktion noch akkurate statistische Kennwerte zur physischen Vulnerabilität gegenüber dynamischen Überschwemmungen mit fluviatlem Feststofftransport existieren. Das Intensitätskriterium $v \cdot h$ [m^2/s] und die von Loat und Petraschek (1997) vorgeschlagenen Intensitätsklassen weisen im Zusammenhang mit Vulnerabilitätsanalysen potentiell Defizite auf, da sie auf Grundlage der menschlichen Gefährdung konzipiert worden sind. Mit Blick auf die mittlerweile schweizweit zur Gefahrenkartierung angewendeten numerischen 2D-Überschwemmungssimulationen wäre ein auf zeitgleich maximaler Fliesstiefe, Ablagerungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierendes Klassierungssystem für Vulnerabilitätsanalysen von Vorteil. Dabei sollte das Intensitätskriterium für die Definition der Klassengrenzen die für die Schadenentstehung massgebenden Einwirkungen auf die Gebäudestruktur berücksichtigen. Neben den fehlenden robusten Vulnerabilitätswerten gibt es gemäss Hufschmidt und Glade (2010) ausserdem zur Zeit auch noch keine standardisierten Methoden für Vulnerabilitätsbeurteilungen.

Schlussendlich wäre ein grundsätzlich verbessertes Verständnis von physischer Vulnerabilität und Faktoren, welche diese steuern, beispielsweise für die effiziente Kosten-Nutzen-Analyse von Schutzmassnahmen oder den Objektschutz wünschenswert. Durch ein verbessertes Verständnis könnten Anpassungen an der Gebäudestruktur oder der unmittelbaren Umgebung vorgenommen werden, welche die physische Vulnerabilität und damit das Risiko senken würden. Zur Zeit werden diesbezüglich unter anderem seitens SIA (schweizerischer Ingenieur und Architektenverein) Anstrengungen unternommen, welche auf das Naturgefahren gerechte Bauen abzielen.

1.4 Zielsetzungen und Fragestellungen

Die vorliegende Masterarbeit soll die Vulnerabilität von Wohngebäuden im Einflussbereich einer feststoffführenden Überschwemmung im alpinen Kontext anhand einer Fallstudie des Ereignisses in Baltschieder im Jahr 2000 quantitativ untersuchen. Einen Beitrag zur Lösung des oben beschriebenen Problems des Datenmangels zu leisten und einen methodischen Vorschlag zur Vulnerabilitätsanalyse mit Hilfe numerischer Simulation auszuarbeiten, ist dabei das primäre Ziel. Die Schadenempfindlichkeit wird auf Grundlage von Versicherungsdaten aus dem Portfolio der schweizerischen Mobiliar Versicherungsgesellschaft AG (kurz Mobiliar) bestimmt. Es soll zudem ein auf den schadensverursachenden, physischen Einwirkungen auf ein Gebäude basierendes Klassierungssystem aus den Intensitätskriterien Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit hergeleitet werden. Alle drei Intensitätsparameter werden dabei durch eine ex-post Simulation mit der 2D-Simulationssoftware BASEMENT bestimmt und sollen der Dynamik während eines Ereignisses gerecht werden. Bildmaterial und die nach dem Ereignis aufgenommenen Ablagerungshöhen werden für den Simulationsprozess dabei als Kalibrierungsmittel eingesetzt. Mit der Simulation wird so versucht von den vorhandenen Informationen zur Ablagerungshöhe am Ende des Ereignisses in sich konsistent und flächendeckend auf die jeweilige Fliesstiefe und -geschwindigkeit während des Ereignisses zu schliessen.

Die Schadenempfindlichkeit der zu untersuchenden Wohngebäude wird aufgrund der simulierten Intensitätswerte und des neu entwickelten Klassierungssystems einer Intensitätsklasse zugeordnet. Die gefundenen Schadenempfindlichkeits-Intensitätspaare sollen anschliessend für jede Intensitätsklasse statistisch ausgewertet werden und in Form von Kennzahlen wie Mittelwert oder Median die physische Vulnerabilität innerhalb einer Intensitätsklasse charakterisieren. So wird einerseits versucht die Datengrundlage im regionalen, alpinen Rahmen zu verbessern. Andererseits werden erstmals Vulnerabilitätswerte welche mit einem schadenbasierten Klassierungssystem hergeleitet wurden präsentiert. Diese Vulnerabilitätswerte werden zusätzlich auch mit physischen Vulnerabilitätswerten gemäss dem Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) für die gleichen Gebäude in Baltschieder verglichen.

Es soll zusätzlich ein erster methodischer Vorschlag für die Einbindung von BASEMENT im Zusammenhang mit Vulnerabilitätsanalysen präsentiert werden. Dies ist als Beitrag zur Problematik der Unsicherheit bei der Rekonstruktion von Intensitätsparametern nach dem Ereignis und der noch nicht vorhandenen einheitlichen Methodik für Vulnerabilitätsanalysen zu sehen.

Konkret ergeben sich aus den beschriebenen Zielsetzungen folgende Fragestellungen:

1. Was für ein Klassierungssystem mit welchen Intensitätskriterien kann bezogen auf die schadensverursachende Wirkung bei einer Vulnerabilitätsanalyse hergeleitet werden?
2. Wie unterscheiden sich die Ergebnisse der physischen Vulnerabilität mit diesem Klassierungssystem im Vergleich mit dem konventionellen System nach Loat und Petraschek (1997) mit dem Kriterium $v \cdot h$ beim Fallbeispiel Baltschieder ?
3. Welche Objekt- und Umgebungsparameter könnten einen Einfluss auf die physische Vulnerabilität der untersuchten Wohngebäude in Baltschieder gehabt haben?
4. Wie kann BASEMENT bei der Rekonstruktion der Prozessintensität in einer Vulnerabilitätsanalyse verwendet werden?

1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit ist in 8 Kapiteln strukturiert. Nach dieser Einleitung wird in den folgenden zwei Kapiteln ein kurzer Abriss der theoretischen Grundlagen des fluviatilen Feststofftransportes und der Konzepte Risiko und Vulnerabilität gegeben. Der restliche Teil fokussiert dann auf das Fallbeispiel Baltschieder, wobei in Kapitel 4 auf den Untersuchungsstandort und das Einzugsgebiet des Baltschiederbachs eingegangen wird. Im darauf folgenden Methodenkapitel wird schliesslich die konzeptionelle Umsetzung und für die Gewinnung von Resultaten angewendeten Methoden im Fokus stehen. Nachdem anschliessend in einem weiteren Kapitel die Resultate dargelegt werden, folgt zum Abschluss die Diskussion und Einordnung der gemachten Forschungsergebnisse mit einem Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf.

KAPITEL 2:

FLUVIATILER FESTSTOFFTRANSPORT

Fluviatiler Feststofftransport ist in Gebirgsflüssen ein omnipräsenter Prozess, bei welchem Geschiebe, Feinsedimente und schwimmende Komponenten verfrachtet werden. Tritt dieser Prozess in Form einer Überschwemmung auf, kann es zu beträchtlichen schadenverursachenden Einwirkungen auf Infrastruktur und Gebäude kommen.

Auf den folgenden Seiten wird der Begriff fluviatiler Feststofftransport zunächst definiert und abgegrenzt. Anschliessend wird das System Gebirgsfluss mit seinen räumlichen Bestandteilen besprochen und dann auf den funktionalen Prozessablauf fokussiert. Abschliessend wird dann noch auf die Ursachen von Überschwemmungen mit fluviatilem Feststofftransport eingegangen.



Titelbild von Kapitel 2: Lonza bei Steg mit durch Seitenerosion ausgelöster Rutschung als Beispiel eines Gebirgsflusses mit fluvialem Feststofftransport.

2.1 Definition

Als Hochwasser wird ein Abfluss eines Fließgewässers verstanden, welcher zeitlich begrenzt ist und über dessen Basisabfluss liegt (Leser, 2005). Gemäss Loat und Petraschek (1997) können Hochwasser allgemein durch die Subprozesse Überschwemmung, Ufererosion und Übermürung gefährdend auf menschliche Infrastruktur einwirken. Überschwemmungen sind durch den Austritt von Gewässern über ihre Ufer oder ihr Gerinne definiert und treten entweder statisch oder dynamisch auf. Im Gegensatz zu statischen Überschwemmungen werden dynamische Überschwemmungen durch grössere Fließgeschwindigkeiten >1 m/s (Egli, 2007) charakterisiert, welche den Feststofftransport ermöglichen.

Beim fluviatilen Feststofftransport werden Feststoffe in Form von Geschiebe, Schwimm- und Schwebstoffen von einem Fließgewässer im oder (bei einer dynamischen, feststoffführenden Überschwemmung) ausserhalb des Gerinnes transportiert (Hübl et al., 2011). Hübl et al. (2006) stellt den fluviatilen Feststofftransport dabei in einem funktionalen Dreieck aus Wasser, Fein- und Grobmaterial dar (Abbildung 10). Der fluviatile Feststofftransport wird darin als Prozess zwischen Murgang / murartigem Feststofftransport und Hochwasser mit variablen Anteilen an Geschiebe- und Schwebstofffracht klassiert. Während die Abgrenzung zum Hochwasser, welches durch einen im Vergleich zu den Feststoffen sehr hohen Wasseranteil definiert ist, noch relativ eindeutig ist, ist die Unterscheidung zum murartigen Feststofftransport oder Murgang deutlich unschärfer. Im Folgenden Unterkapitel wird deshalb kurz auf die Unterschiede der beiden Prozessstypen eingegangen.

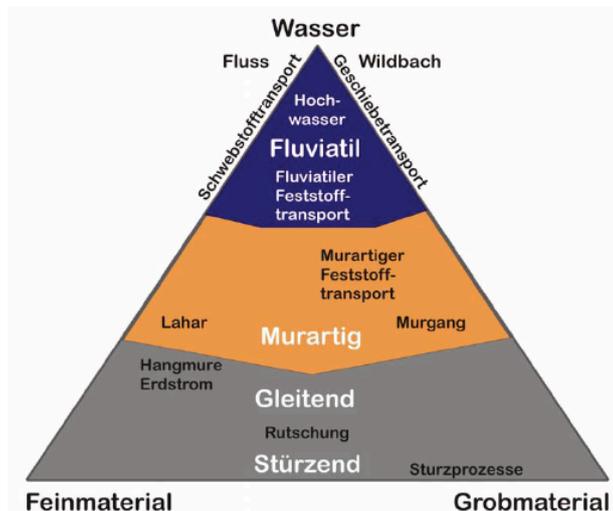


Abbildung 10: Funktionales Dreieck aus Feinmaterial, Grobmaterial und Wasser mit verschiedenen gravitativen Massenbewegungen (Hübl et al., 2006).

2.1.1 Abgrenzung fluviatiler Feststofftransport zum Murgang / murartigem Feststofftransport

Es besteht definitionsgemäss ein fließender Übergang zwischen dem Prozess des fluviatilen Feststofftransports mit starker Geschiebeführung und Murgängen beziehungsweise murartigem Feststofftransport (auch hyperkonzentrierter Abfluss genannt). Der murartige Feststofftransport oder hyperkonzentrierte Abfluss bildet das Bindeglied und den Übergang zwischen fluviatilem Feststofftransport und Murgang. Alle dieser drei Prozesse und deren Übergänge können in Wildbacheinzugsgebieten ablaufen. Gebirgsflüsse mit ihrem geringeren Gefälle und grösseren Einzugsgebieten sind jedoch meist nicht murfähig. In ihnen dominiert der fluviatile Feststofftransport (Bezzola und Hegg, 2008). Weiter weist der fluviatile Feststofftransport nach ONR-24800 (2009) ein newtonisches Fließverhalten auf, währenddem murartige Prozesse zu einem eher nicht newtonischen Fließverhalten tendieren.

Wasser und Feststoffe bewegen sich in murartigen Prozessen also als zähflüssiges Fluid in der gleichen Geschwindigkeit vorwärts, was dazu führt, dass bei Murgängen und murartigem Feststofftransport keine ausgeprägte Sortierung der abgelagerten Feststoffe zu beobachten ist. Bei fluviatilen Feststofftransport werden hingegen ausschliesslich schwimmende Komponenten in einer der Fließgeschwindigkeit äquivalenten Geschwindigkeit transportiert. Geschiebe wird langsamer als die Fließgeschwindigkeit vorwärts bewegt.

Die volumetrische Feststoffkonzentration ist im direkten Vergleich beim fluviatilen Feststofftransport deutlich geringer als beim Murgang, was folglich zu einer geringeren Dichte des Wasser-Feststoffgemisches führt. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Unterschiede bei der Abgrenzung von murartigen und fluviatilen Verlagerungsarten gemäss (ONR-24800, 2009) zusammengefasst:

Tabelle 6: Eigenschaften und Merkmale von Hochwasser und Murgangprozessen (ONR-24800, 2009)

Verlagerungstyp	Hochwasser		Mure	
Verlagerungsart	fluvial		murartig	
Terminus (dt.)	Hochwasser	Fluvialer Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport (hyperkonzentrierter Abfluss)	Murgang
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwach Feststofftransport	stark	Murgang
Fliessverhalten	Newtonisch	Newtonisch	Annähernd Newtonisch	Nicht-Newtonisch
Vol. Feststoffkonzentration	Promillebereich	0-20%	20-40%	>40%
Grösstkorn	mm-cm	-dm	-m	-m
Dichte [kg/m³]	1000	<1300	1300-1700	>1700
Viskosität [Pas]	0.001-0.01	0.01-0.2	0.2-2	>2
Scherfestigkeit	Keine	Keine	Keine	vorhanden
Verteilung der Feststoffe im Querschnitt	Feststoffe sohlen-nah und schwebend verteilt im Querschnitt	Feststoffe sohlen-nah und schwebend verteilt im Querschnitt	Feststoffe und Schwebstoffe verteilt im Querschnitt	Feststoffe verteilt im Querschnitt
Ablagerungsform (stumme Zeugen)	Bankige Feinstoffrückstände	Sortierte Fächer und Lappen	Bänke und Lappen zumeist korngestützt. Grobgeschiebe bis in hohe Wasserspiegel abgelagert	Murköpfe (Levéés) und zungenförmige Lappen, korner oder matrixgestützt, zumeist scharfe Begrenzung der Ablagerungen, U-förmiges Abflussprofil
Sortierung der abgelagerten Feststoffe	Vorhanden	Vorhanden	Eher nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Schaden durch	Wasser und Schwebstoffe	Wasser, Schwebstoffe und Geschiebe	Feststoffe und Wasser	Feststoffe (und Wasser)

2.2 Das System Gebirgsfluss

Da es sich beim Baltschiederbach, welcher im Zentrum dieser Fallstudie steht, per Definition eher um einen Gebirgsfluss handelt, wird im Folgenden näher auf die Definition eines Gebirgsflusses als potentielles System für feststoffführende Überschwemmungen eingegangen:

Gebirgsflüsse sind massgeblich durch den Geschiebetransport beeinflusst und weisen im Vergleich zu Wildbächen ein grösseres Einzugsgebiet von > 20 km² bis wenige 100 km² auf (WSL, 2014). Bedingt durch das grössere Einzugsgebiet vollzieht sich der Anstieg eines Hochwassers gemässiger als bei

Wildbächen. Die Abflussspitzen sind aber höher und liegen zwischen $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und einigen $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Neigung des Gerinnes liegt zwischen 5-10 % und ist damit geringer als bei Wildbächen ($>10 \%$) (Rickenmann et al., 2008). Neben Geschiebe- zählen auch der Schwemmh Holztransport und die Tiefen- oder Seitenerosion zu den beobachteten Phänomenen bei Hochwassern in Gebirgsflüssen (Hählen, 2012).

Räumlich lässt sich das Einzugsgebiet eines Gebirgsflusssystem in ein Sammelgebiet, eine Umlagerungsstrecke und ein mehr oder weniger deutlich vorhandenes Ablagerungsgebiet unterteilen (Abbildung 11), auf welche nachfolgend näher eingegangen wird. Im Gegensatz zum klassischen Wildbach ist die Umlagerungsstrecke morphologisch häufig nicht als kurze, steile Schlucht ausgeprägt (Hübl, 2009). Zwischen den beiden Formen Wildbach und Gebirgsfluss besteht ein fließender Übergang.

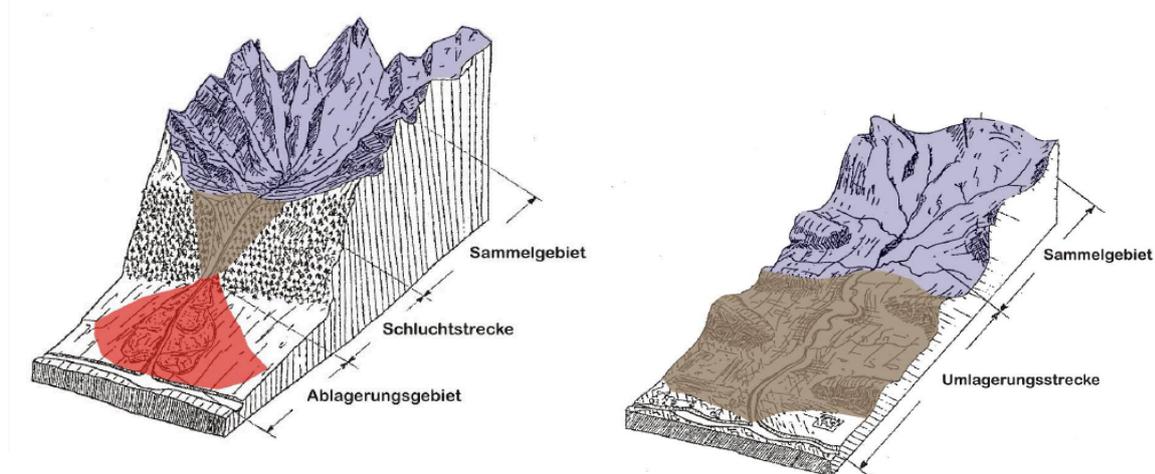


Abbildung 11: A: Darstellung der drei räumlichen Komponenten eines Gebirgsflusssystem mit Sammelgebiet, Schluchtstrecke und Ablagerungsgebiet. B: Ausprägung eines Gebirgsflusssystem ohne deutlich ausgeprägte Schluchtstrecke (Hübl et al., 2011).

2.2.1 Sammelgebiet

Das Sammelgebiet umfasst den Oberlauf des Gebirgsflusses und dessen laterale Zubringerbäche, welche in den Gebirgsfluss münden. Häufig handelt es sich bei den Zubringerbächen um sehr steile Wildbäche, welche Murkegel beim Übergang zum Gebirgsfluss bilden. Das Sammelgebiet stellt gemäss Hübl et al. (2011) das eigentliche hydrographische Einzugsgebiet dar. Es wird durch Wasserscheiden begrenzt und entwässert ein Gebiet durch den Gebirgsfluss und seine Zubringerbäche (Lenser, 2005). Hier kommt es zur eigentlichen Abflussbildung.

2.2.2 Umlagerungsstrecke

Die Umlagerungsstrecke kennzeichnet den Bereich des Gebirgsflusssystem, in welchem Geschiebe und andere Feststoffe zugeführt, in Form von Geschiebedepots abgelagert und periodisch bei entsprechender Transportkapazität durch Hochwasser wieder abtransportiert werden. Umlagerungsstrecken treten oft im Mittellauf auf, können aber streckenweise an allen Stellen des Flusslängsprofils vorkommen (Bergmeister et al., 2009).

2.2.3 Ablagerungsgebiet

Laut Hübl et al. (2011) kann das Ablagerungsgebiet für flachere Einzugsgebiete, in welchen rein fluviatile Hochwasser dominieren, entfallen, da sämtliche bewegte Feststoffe längerfristig in den Vorfluter transportiert werden. Dennoch ist es häufig so, dass sich in Gebirgsflüssen und Mischformen zwischen Wildbach und Gebirgsflüssen ein Ablagerungsgebiet bilden kann. Im Ablagerungsgebiet werden die mitgeführten Feststoffe aufgrund der abnehmenden Transportkapazität des Gebirgsflusses abgelagert. Die Abnahme der Transportkapazität erfolgt meist in Zusammenhang mit der Abnahme der Schleppspannung bei abnehmender Fließgeschwindigkeit infolge einer Abnahme des Gefälles beim Übergang in die Talebene (Zepp, 2008). Dies führt zur charakteristischen Form des Schwemmkegels oder Schwemmfächers, wobei Schwemmfächer im Vergleich zum Schwemmkegel durch sehr geringe Neigungen charakterisiert sind (Busch, 1986). Schwemmkegel und Schwemmfächer sind morphologische Sedimentationsformen, welche meist einen halbkreisähnlichen Grundriss und einen konvexen Querschnitt aufweisen (Bergmeister et al., 2009). Auf dem Schwemmkegel oder Schwemmfächer eines Gebirgsflusses ist eine Sortierung vom groben Material im Kegelhalsbereich hin zu Feinanteilen bei der Mündung in den Talfluss zu beobachten.

2.3 Prozessablauf

Der fluviatile Feststofftransport ist, wie in Abbildung 12 dargestellt, durch mehrere zum Teil interagierende Prozesse charakterisiert. Es bietet sich deshalb an, den gesamten Prozessablauf von der Geschiebeaufbereitung, -lieferung, dem Feststofftransport bis hin zur abschliessenden Ablagerung zu unterteilen und im Folgenden einzeln zu diskutieren.



Abbildung 12: Prozessablauf des Geschiebehaushalts im Zusammenhang mit fluviatilem Feststofftransport am Beispiel des Baltschiederbachs bei Tuntscheta auf 1013 m.ü.M (© Google Earth).

2.3.1 Geschiebeaufbereitung

Bei der Geschiebeaufbereitung wird grundsätzlich zwischen Altschutt und Jungschutt als Geschiebequellen differenziert (Stiny, 1931). Jungschutt wird dabei rezent und kontinuierlich durch Verwitterungsprozesse, bei welchen Gesteinsfragmente aus dem Festgestein herausgelöst werden, gebildet. Die Produktion dieser Gesteinsfragmente und damit des späteren Geschiebes ist im Hochgebirge dabei hauptsächlich von der Verwitterungsresistenz des Festgesteins und der Häufigkeit von Frost-Tauzyklen abhängig (Mani, 1996). Jungschuttablagerungen sind meist relativ locker gelagert, weshalb ihr Böschungswinkel in etwa dem Winkel der inneren Reibung entspricht (Hählen, 2012).

Altschuttherde wurden in vergangener Zeit durch Prozesse gebildet, welche rezent an diesem Ort nicht mehr ablaufen. Bei Altschutt findet also aktuell keine neue Geschiebeproduktion mehr statt. Beispiele sind eiszeitliche Moränenablagerungen, relikte Schuttkegel oder glaziofluviale Talfüllungen. Im Gegensatz zu Jungschuttquellen können sich im Altschutt steilere Böschungswinkel ausbilden, da Feinkomponenten vorhanden sind oder das Material glazial konsolidiert wurde (Hählen, 2012). Ein weiterer Unterschied zum Jungschutt besteht darin, dass bei Gerinnen, welche durch Altschutt fließen, grundsätzlich keine Limitation des Geschiebepotentials vorliegt. Aus diesem Grund kann im Altschutt Geschiebe bis zur Auslastung der Transportkapazität mobilisiert werden (Mani, 1996).

2.3.2 Geschiebe- und Schwemmholzlieferrung

Die Geschiebelieferung beschreibt den Vorgang des Transports von der Geschiebequelle (Jungschutt/Altschutt) in das Gerinne des Gebirgsflusses oder seiner Zubringerbäche. Dieser Transport kann durch verschiedene Massenbewegungsprozesse erfolgen. Laut Bunza et al. (1982) sind Sturzprozesse, Rutschungen und Fliessprozesse relevante Massenbewegungen für die Geschiebelieferung in oder unmittelbar ans Gerinne. Welche Prozesse zur Verlagerung des Geschiebes beitragen, hängt von dessen Eigenschaften und dem Relief ab. Massiges Gestein wird eher durch Sturzprozesse als Blöcke und Steine, feinkörniges Material eher durch Fliess- und Rutschprozesse wie Hangmuren oder Uferrutschungen verlagert (Mani, 1996). Bereiche in welchen Geschiebelieferungsprozesse wirken, werden nach Zimmermann (1989) als geschieberelevant bezeichnet.

Neben Geschiebe kann auch Holz ein wichtiger Feststoff darstellen, der ins Gerinne geliefert wird. Bänziger (1989) unterscheidet dabei in seiner Untersuchung über die Herkunftsorte des Schwemmholzes im Wesentlichen drei Schwemmholzquellen: Wirtschaftsholz, Totholz und Grünholz. Wirtschaftsholz bezeichnet dabei ungünstig angelegte Holzdepots von Schreinereien, Sägereien, Forstbetrieben oder Privatpersonen, welche während des Ereignisses in das Gewässer gelangen. Totholz ist als bereits abgestorbenes Holz definiert, welches zum Teil bereits im Gerinne liegt. Grünholz schliesslich ist Holz von lebenden Bäumen, welche während des Hochwasserereignisses durch Hangrutschungen und Seitenerosion ins Gerinne gelangen (Lange und Bezzola, 2006). Gemäss Waldner et al. (2009) stammt der grösste Teil des anfallenden Schwemmholzes meist aus Grünholz von Seitenerosionen, Hangmuren und ans Gerinne angrenzenden Runsen. In Abbildung 13 sind im Vordergrund zur Verdeutlichung zwei umgeknickte Birken mit Wurzelstock als Grünholz und Totholz in unterschiedlicher Grösse im Hintergrund zu sehen.

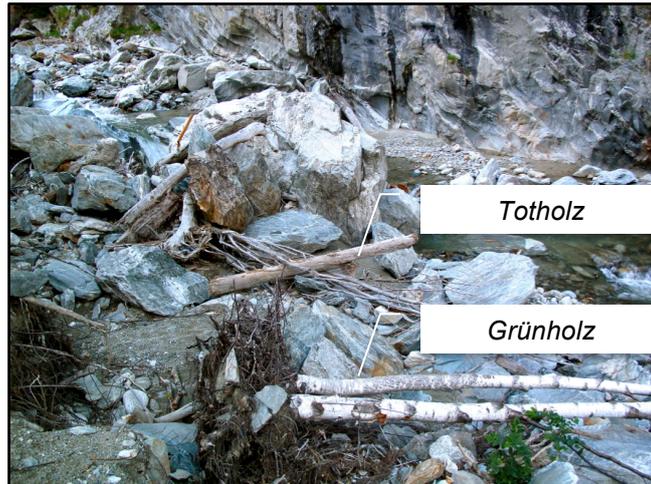


Abbildung 13: Potentielles Schwemmholz im Baltschiederbach bei „Äbi“ im Baltschiederatal.

2.3.3 Feststofftransport

Der Transportprozess von Feststoffen im Gerinne erfolgt schliesslich in den drei nachfolgend beschriebenen Phasen der Mobilisierung, der eigentlichen Verlagerung und der Ablagerung (Hegg et al., 2001).

2.3.3.1 Mobilisierung

Als Mobilisierung wird die Ablösung von Feststoffen am Ufer und an der Gerinnesohle bezeichnet. Die Mobilisierung am Ufer erfolgt dabei hauptsächlich durch Seitenerosion des Fliessgewässers. Seitenerosion bezeichnet dabei einen seitlich wirkenden Erosionsprozess entlang der Ufer des Gewässers. Meist ist dieser Prozess auf den Prallhang eines Fliessgewässers konzentriert (Rudolf-Miklau und Suda, 2012).

Neben der Seitenerosion ist die Tiefenerosion, welche zur Aufnahme und Abtransport von Feststoffen aus der Gerinnesohle führt, ein weiterer wichtiger Prozess für die Mobilisierung von Feststoffen.

Allgemein kommt es zur Aufnahme von Feststoffen (Geschiebe, Feinanteile, Schwemmholz), wenn deren rückhaltenden Kräfte kleiner werden als die durch die Strömung verursachten Kräfte, welche schliesslich zur Vorwärtsbewegung führen (Zepp, 2008). Dies ist konkret der Fall, wenn die Schleppspannung des fliessenden Wassers gross genug ist, um einen Partikel aus der bisherigen Position herauszureissen. Die dazu benötigte kritische Schleppspannung hängt dabei von der Fliesstiefe und dem Gefälle ab (Hegg et al., 2001) und muss mit zunehmender Partikelgrösse, Festigkeit der Gerinnesohle und Kohäsion der Einzelpartikel grösser sein (Sendzik, 2003; Hählen, 2012). Die grösste Partikelgrösse, welche vom Fliessgewässer mit bestimmter Fliesstiefe und Gefälle mobilisiert werden kann, beschreibt dabei die sogenannte Kompetenz (Siever et al., 2008).

Neben der beschriebenen Schleppspannung spielen nach oben gerichtete Auftriebskräfte, vor allem bei turbulentem Fliessverhalten eine wichtige Rolle bei der Mobilisierung von Partikeln. Durch den Umstand, dass verschiedene Partikel unterschiedlich stark aus der Gerinnesohle herausragen, sind sie unterschiedlichen Fliessgeschwindigkeiten ausgesetzt. Bedingt durch die Reibung wirken beispielsweise auf einen Stein, welcher einen Meter über das Gerinnebett herausragt, geringere Flies-

geschwindigkeiten nahe an der Sohle als an seiner Spitze. Aus diesem Grund kommt es zu einem nach oben gerichteten Druckgradienten. Dieser ist vom Prinzip vergleichbar mit dem Tragflügeleffekt bei einem Flugzeug und führt zusammen mit Verwirbelungen hinter dem Partikel zur Lösung und Anhebung des Sedimentpartikels aus dem Gerinnebett (Zepp, 2008).

Sogenannte Residualblöcke, welche aus der Sohle herausgewaschen wurden oder durch Massenbewegungen ins Gerinne gelangten, werden bei häufigeren Abflüssen mit geringer Magnitude nicht mobilisiert, da die Schleppspannung bei diesen Ereignissen dafür nicht ausreichend ist (Jäggi et al., 2004). Sie können sogenannte stabile Deckschichten ausbilden, auf welchen feineres Geschiebe jeweils vorwärtstransportiert wird (Sendzik, 2003). Eine Ausprägung solcher stabilen Strukturen manifestiert sich in Gebirgsflüssen häufig als typische Stufen-Becken-Strukturen (Whittaker und Jäggi, 1982) (Abbildung 14), welche erst bei seltenen Abflussereignissen mit entsprechender Magnitude der Schleppspannung instabil werden und zu einem sprunghaften Anstieg des Geschiebeaufkommens führen (Bezzola et al., 1990).



Abbildung 14: Für Gebirgsflüsse typische Stufen-Becken-Struktur im Baltschiederbach bei „Äbi“.

2.3.3.2 Verlagerung / Transport

Die auf die Mobilisierung folgende Verlagerung der Feststoffe als zweite Komponente des Transportprozesses erfolgt im Wesentlichen auf drei verschiedene Arten:

Geschiebetransport: Nach Hegg (2001) bezeichnet diese Transportform die „rollende, gleitende oder springende Verlagerung von Feststoffen entlang der Sohle des Gerinnes unter der Wirkung der Schleppspannung des Wassers“. Als Geschiebe werden dabei alle Feststoffe bezeichnet, welche auf dieser Art entlang der Sohle transportiert werden. Liegt die Schleppspannung (auch Schubspannung genannt) unterhalb eines kritischen Wertes, wird die dominante Korngrösse der Sohlenoberfläche nicht transportiert und es bildet sich eine stabile Deckschicht aus. Auf dieser Deckschicht wird dann wie in Abbildung 15 dargestellt feineres Sediment auf der Deckschicht als Geschiebe bewegt und transportiert (Sendzik, 2003). Je nach herrschender Schleppspannung setzt sich die Geschiebefracht aus variierenden Anteilen der Block, Stein, Kies und Sandfraktion zusammen (Zepp, 2008).

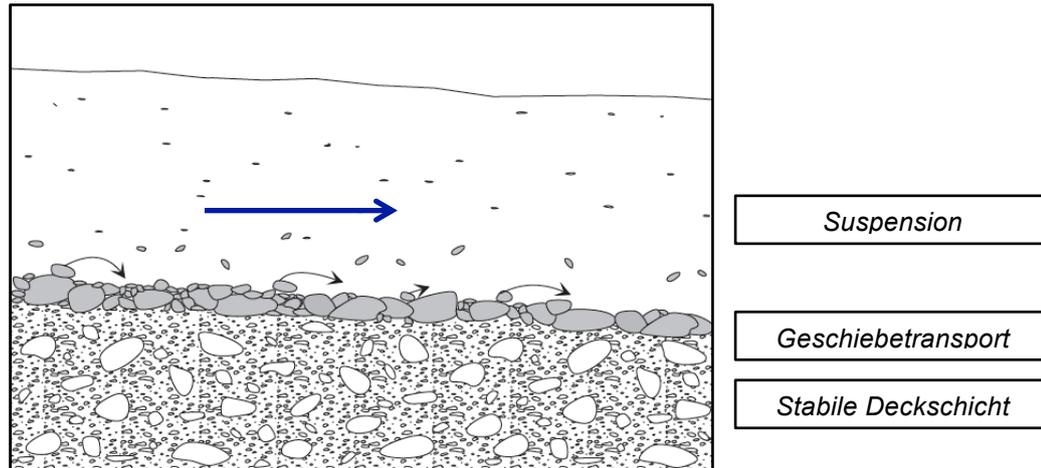


Abbildung 15: Schematische Darstellung des rollenden, gleitenden und springenden Geschiebetransportes auf einer stabilen Deckschicht entlang der Sohlenoberfläche und der in Suspension gehaltenen Partikeln. Die Fließrichtung des Gewässers ist mit einem blauen Pfeil eingezeichnet (abgeändert nach Sendzik, 2003).

Transport in Suspension: Der Transport als Suspensionsfracht (Schwebstoffe) bezeichnet die Transportform, bei der meist Feinsediment innerhalb der Strömung schwebend fortbewegt wird (Siever, 2008). Ob ein Partikel in Suspension transportiert wird, hängt von seiner Dichte, der Korngrösse und Form, sowie der Dichte des Wasser-Feststoffgemisches und den darin herrschenden Auftriebskräften ab. Die Auftriebskräfte müssen dabei die Sinkgeschwindigkeit des Partikels in Suspension kompensieren, um diesen in der Schwebe halten zu können (Zepp, 2008).

Transport schwimmend an der Oberfläche: Alle Feststoffe deren spezifisches Gewicht kleiner als dasjenige des Wasser-Feststoffgemisches ist, werden schwimmend an der Wasseroberfläche des Fließgewässers transportiert. Da Baumholz (Baumstämme, Äste und Wurzelstöcke) im Mittel eine Rohdichte von 500 kg/m^3 (Lange und Bezzola, 2006) aufweist, wird es in Gebirgsflüssen meist auf diese Weise transportiert. Holz, welches während des Hochwasserereignisses im Fließgewässer schwimmend transportiert wird, wird nach Lange und Bezzola (2006) als Schwemmholz bezeichnet; ungeachtet seiner Herkunft.

Schwemmholz kann im Zuge der Verlagerung zu Verstopfungen, sogenannten Verklausungen führen und damit die Ausbruchstelle einer Überschwemmung bestimmen. Im Falle einer Überschwemmung kann der Anprall von Wurzelstöcken oder Baumstämmen ausserdem zu Schäden an der Gebäudehülle führen (Rudolf-Miklau et al., 2011). Das Schwemmholz kann dabei eine beträchtliche Anprallenergie entwickeln, da sich einzelne Stämme meist in Fließrichtung ausrichten (Abbildung 16) und aufgrund der horizontalen Geschwindigkeitsverteilung eher in der Gerinnemitte schwimmen, wo die grössten Fließgeschwindigkeiten herrschen (Mazzorana, 2007). Im Gegensatz zum Geschiebetransport ist die Transportgeschwindigkeit von Schwemmholz mit der Fließgeschwindigkeit des Wassers gleichzusetzen und dementsprechend im direkten Vergleich höher.

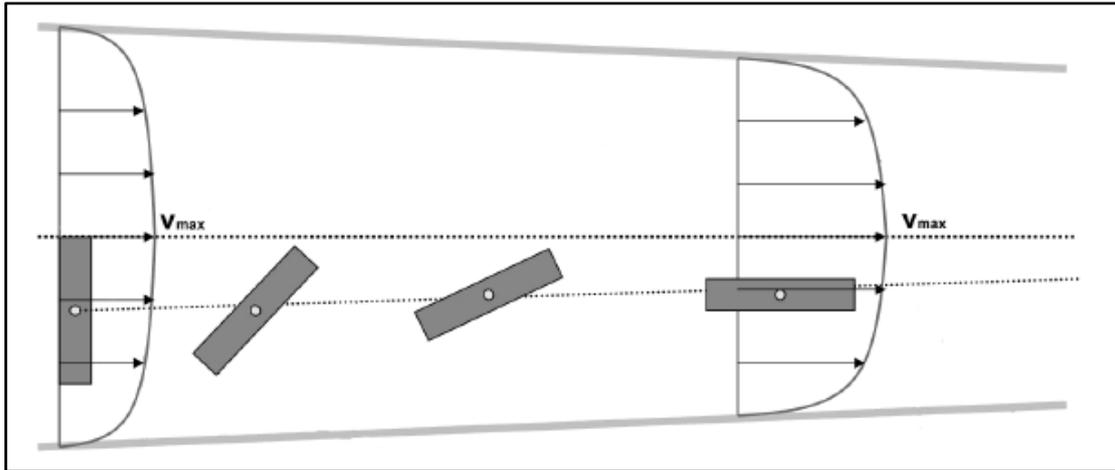


Abbildung 16: Horizontale Geschwindigkeitsverteilung und Ausrichtung eines einzelnen Baumstammes auf einem Fließgewässer (Mazzorana, 2007).

Auf den Transport in Lösung wird hier nicht weiter eingegangen, da dabei genau genommen keine Feststoffe mehr transportiert werden.

2.3.3.3 Ablagerung

Sobald die Transportkapazität des Fließgewässers soweit nachlässt, dass die zuvor in Suspension gehaltenen, schwimmend oder als Geschiebefracht bewegten Feststoffe nicht mehr weiter transportiert werden können, kommt es zur Akkumulation. Die Schwebstoffe in Suspension sedimentieren, sobald die Fließgeschwindigkeit und die durch Turbulenz verursachten Auftriebskräfte einen kritischen Wert unterschreiten. Zur Akkumulation des Geschiebes kommt es bei einer Abnahme der Fließtiefe durch Gerinneverbreiterung oder einer Abnahme der Fließgeschwindigkeit in Folge einer Geländeverflachung, wodurch die Schleppspannung abnimmt (Hegg, 2001). Zuvor schwimmend transportierte Komponenten, wie etwa Schwemmholz, werden laut Zollinger (1983) abgelagert, sobald die Wassertiefe etwa dem Durchmesser des Schwemmholzes entspricht.

Bei der Ablagerung bilden sich nach Hübl et al. (2011) nach der Korngrösse sortierte Fächer und Lappen als geomorphologische Form. Die Ablagerung des Sediments kann dabei innerhalb und ausserhalb des Gerinnes erfolgen. Die Ablagerung von Schutt und Geröll neben das Gerinne als Folge einer Überschwemmung wird in diesem Zusammenhang gemäss Loat und Petraschek (1997) als Übersarung bezeichnet. Beim Übergang von einem Seitental in ein Haupttal bildet sich häufig die morphologische Akkumulationsform eines Schwemmfächers-/kegels aus, welcher durch eine Sortierung von größerem Material am Kegelhals zu feinerem Material zum Vorfluter hin charakterisiert ist (Hegg, 2001).

Der in diesem Unterkapitel beschriebene Feststofftransport mit den Subprozessen Verlagerung und Ablagerung kann zusammenfassend beispielsweise nach Shields (1936) als Funktion der kritischen dimensionslosen Schleppspannung θ_{cr} (Shields Parameter) und der kritischen Korn-Reynolds-Zahl Re_{cr}^* dargestellt werden. Dabei stellt die Korn-Reynolds-Zahl das Verhältnis des Korndurchmessers zur Dicke der laminaren Unterschicht dar (Abbildung 17).

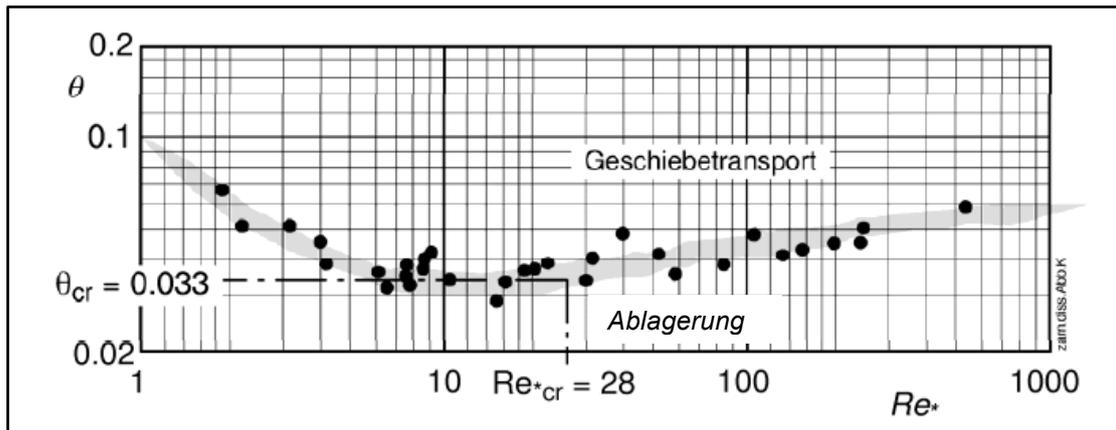


Abbildung 17: Darstellung Verlagerung und Ablagerung als Funktion der dimensionslosen Schleppspannung θ_{cr} und der kritischen Korn-Reynolds-Zahl Re^*_{cr} (abgeändert nach Shields, 1936).

2.4 Ursachen für Überschwemmungen mit fluvialem Feststofftransport

Fluvialer Feststofftransport wird zur Naturgefahr, wenn er gefährdend auf menschliche Infrastruktur einwirkt. Dies ist meist bei einer Überschwemmung, also dem Austritt des Fließgewässers aus dem eigentliche Gerinne, der Fall. Um die Ursachen für Überschwemmungen mit fluvialem Feststofftransport zu verstehen, lässt sich das für Naturgefahren verwendete theoretische Konzept der Disposition anwenden. Unter Disposition versteht man dabei gemäss Hochschwarzer (2009) die Bereitschaft eines Gebietes zur Bildung und Auslösung eines gefährdenden Prozesses. Das Konzept beruht im Wesentlichen auf der Unterscheidung der Grunddisposition, variablen Disposition und dem auslösenden Ereignis. Die Grunddisposition und die variable Disposition bilden zusammen die sogenannte aktuelle Disposition. Wenn die aktuelle Disposition im Verhältnis zu einem gleichzeitig stattfindenden potentiell auslösenden Ereignis genügend hoch ist, kommt es wie in Abbildung 17 dargestellt zur Auslösung und damit in diesem Fall zu einer feststoffführenden Überschwemmung.

Anhand der Abbildung 18 kann das Konzept anhand von 3 Fällen veranschaulicht werden:

- Bei einer gegebenen Grunddisposition und einer geringen variablen Disposition kommt es aufgrund der geringen aktuellen Disposition trotz Belastung durch ein potentiell auslösendes Ereignis nicht zur Auslösung.
- Bei entsprechender höherer variabler Disposition zu einem späteren Zeitpunkt führt ein potentiell auslösendes Ereignis mit ähnlicher Magnitude wie bei a) aber zur Auslösung der feststoffführenden Überschwemmung.
- Nach Ablauf der feststoffführenden Überschwemmung ist die variable Disposition auf ein Minimum reduziert, da beispielsweise das meiste Geschiebe durch das Ereignis ausgeräumt wurde. Trotz eines potentiell auslösenden Ereignisses mit höherer Magnitude als in b) kommt es in diesem Fall nicht zur Auslösung.

In den folgenden Unterkapiteln wird näher auf Grund-, variable Disposition und das auslösende Ereignis eingegangen.

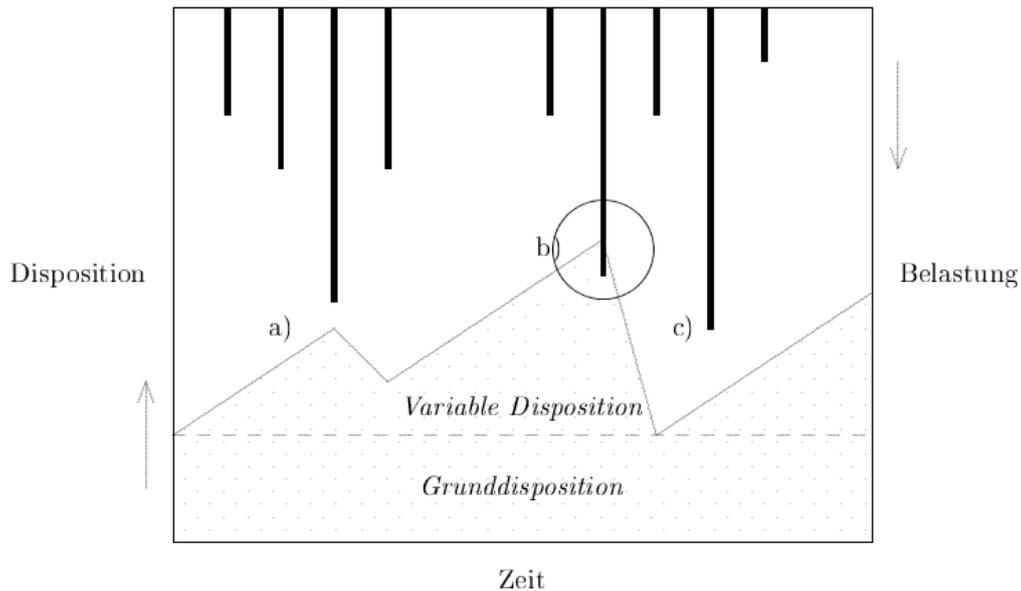


Abbildung 18: Zusammenspiel der Grunddisposition, variablen Disposition (zusammen aktuelle Disposition) und verschiedenen potentiell auslösenden Ereignissen, welche das System belasten (abgeändert nach Gamma, 2000).

2.4.1 Grunddisposition

Als Grunddisposition wird die über längere Zeit (Jahrzehnte/Jahrhunderte) gleich bleibende Bereitschaft oder Anlage für den Ablauf von Naturgefahrenprozessen bezeichnet. Parameter der Grunddisposition im Zusammenhang mit dynamischen, feststoffführenden Überschwemmungen sind beispielsweise Einzugsgebietscharakteristiken wie Relief, das Klima, Bodentypen/-oberflächen oder die Vegetation (Kienholz, 1995). Durch die Grunddisposition wird das räumliche Auftreten und die Magnitude eines Ereignisses bestimmt (Gamma, 2000).

Der Prozess des fluviatilen Feststofftransportes findet wie bereits erwähnt in Wildbächen und Gebirgsflüssen statt. Da diese Fließgewässer per Definition eine gewisse Gerinneneigung haben, ist ein Relief wie es in Gebirgen vorkommt als Grundvoraussetzung für den Ablauf des Prozesses zu sehen.

Die Zusammensetzung der Teilflächen eines Einzugsgebietes gehört ebenfalls zur Grunddisposition und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Abflussreaktion bei einem Niederschlagsereignis. Als Teilflächen sind dabei Gesteins-, Boden- und Gletscherflächen zu verstehen, welche homogene Eigenschaften bezüglich ihrer Infiltrationskapazität aufweisen (Burkard, 2005). Das VAW (1994) hat in diesem Zusammenhang, wie in Abbildung 19 dargestellt, schnell, leicht verzögert, verzögert und stark verzögert reagierende Teilflächen (sogenannte Abflusstypen) unterschieden. Dabei weisen vor allem Flächen des Abflusstyps 4 mit Hangschutt, Sturzablagerungen, durchlässigen Moränen oder tiefgründigen Böden eine hohe Infiltrationskapazität auf und führen damit erst zeitlich stark verzögert zu Oberflächenabfluss (Naef et al., 1998). Geringe Infiltrationskapazitäten, geringes Speichervermögen und dadurch zeitlich schnell einsetzender Oberflächenabfluss weisen Flächen des Abflusstyps 1 mit flachgründigen Böden, vergletscherten Oberflächen oder Gesteinsoberflächen auf.

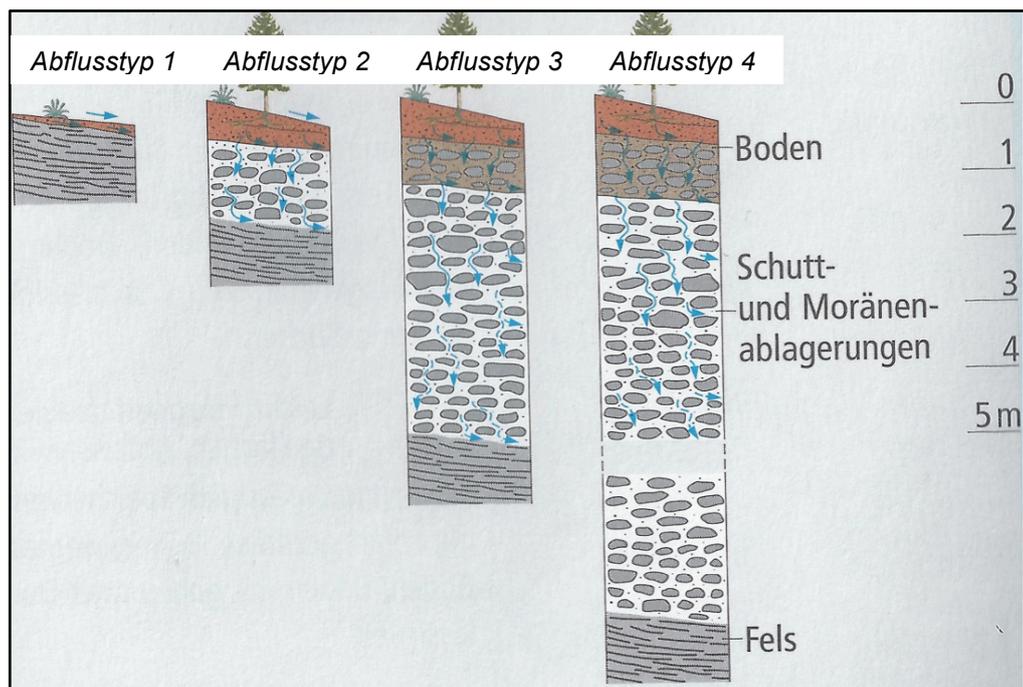


Abbildung 19: Die 4 Abflusstypen abgeändert gemäss VAW (1994) mit ansteigender Infiltrationskapazität von Abflusstyp 1 zu Abflusstyp 4.

Die Vegetationsbedeckung in einem Einzugsgebiet kann auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Grunddisposition haben. Bäume und Sträucher fangen nämlich durch die Interzeption einen Teil des Niederschlags durch Nadeln und Blätter auf. Nach Ende des Niederschlagsereignisses geht dieses aufgefangene Wasser dann grösstenteils über Evapo-Transpiration in die Atmosphäre über, ohne abflusswirksam zu werden (Hegg, 2001). Dementsprechend weisen Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an dichter Vegetation gegenüber vegetationslosen Gebieten eine potentiell geringere Grunddisposition für Hochwasser auf, da Niederschlagsspitzen gebrochen werden.

2.4.2 Variable Disposition

Die variable Disposition kann als zeitlich variable und schwankende Anlage für den Ablauf von Naturgefahrenprozessen bezeichnet werden. Die Variabilität bewegt sich dabei in der Grössenordnung von Tagen bis Jahrzehnten. Beispiele für die variable Disposition bei dynamischen, feststoffführenden Überschwemmungen sind die Materialverfügbarkeit, die meteorologischen Verhältnisse vor dem Ereignis und damit einhergehend die Bodenwasserverhältnisse Gamma (2000). Die einzelnen Faktoren, welche Einfluss auf die variable Disposition nehmen, können miteinander funktional verknüpft sein.

In Bezug auf die meteorologischen Verhältnisse nehmen vor allem die Lufttemperatur und der Niederschlag vor einem Ereignis Einfluss auf die variable Disposition. Niederschlag fällt bei einer Lufttemperatur um 0° Celsius meist als Schnee und wird somit im Gebirge erst im Frühjahr oder Warmphasen während des Winters durch die Schneeschmelze abflusswirksam. Liegt die temperaturabhängige Schneefallgrenze hingegen hoch oben, trägt eine potentiell grössere Fläche des Einzugsgebietes zum Abfluss des Gebirgsflusses und seinen Zubringerbächen bei. Die Schneefallgrenze und damit auch die Lufttemperatur spielt nach Burkard (2005) deshalb eine wichtige Rolle für den Ablauf einer dynamischen, feststoffführenden Überschwemmung.

Die Temperatur und der Niederschlag können neben dem Abfluss in hochalpinen Einzugsgebieten auch Einfluss auf die Materialverfügbarkeit nehmen. Durch das Temperatur bedingte Auftauen des aktiven Layers in Permafrostgebieten wird nämlich die Materiallieferung ins Gerinne erleichtert oder die Mobilisierung durch das nächste Hochwasser erst möglich (Gamma, 2000). Permafrost ist in der Schweiz gemäss Keller et al. (1998) je nach Exposition potentiell ab einer Höhe von 2400 m.ü.M verbreitet.

Weiter können hohe Niederschlagsmengen vor dem eigentlichen Ereignis die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen durch entstehende Kluftwasserdrücke oder Porenwasserdrücke begünstigen. Dies steigert wiederum direkt die Materialverfügbarkeit und damit die variable Disposition für fluviatilen Feststofftransport. Für den fluviatilen Feststofftransport relevant sind dabei vor allem Feststoffe im eigentlichen Gerinne und dem unmittelbar angrenzenden Bereich (Hegg, 2001).

Die Materialverfügbarkeit in einem Jungschutt-Gebirgsfluss ist dabei grundsätzlich als zeitlich variabel zu sehen. Nach einem grossen Ereignis mit fluviatilem Feststofftransport wird viel Material ausgeräumt, wodurch die Materialverfügbarkeit und damit die variable Disposition abnehmen. Durch Massenverlagerungen (Murgänge, Rutschungen, Sturzprozesse) ins Gerinne steigt die Verfügbarkeit und variable Disposition erneut an, bis die aktuelle Disposition bei einem auslösenden Ereignis gross genug ist, um das angesammelte Material wieder als fluviatiler Feststofftransport auszuräumen.

Schliesslich nehmen die Niederschlagsverhältnisse vor dem Ereignis auch Einfluss auf die Infiltrationskapazität des Bodens im Einzugsgebiet: Gemäss Burkard (2005) führen lang anhaltende Niederschläge zur Veränderung der Bodenwasserverhältnisse, was im Extremfall eine vollkommene Sättigung des Bodens zur Folge haben kann. Die abflussverzögernde Wirkung des Bodens nimmt mit Abnahme der Infiltrationskapazität als Folge des Niederschlages ab, was schliesslich dazu führt, dass das Wasser direkt oberflächlich als Oberflächenabfluss bis ins Gerinne des Gebirgsflusses abfließt und dort direkt zum Hochwasserabfluss beiträgt.

2.4.3 Auslösendes Ereignis und Abflussbildung

Das auslösende Ereignis führt zu einer kurzfristigen Belastung des Systems, welche schliesslich in Kombination mit der herrschenden aktuellen Disposition den Ablauf des Naturgefahrenprozesses einleitet. Das jeweilige Ereignis dauert dabei wenige Minuten bis einige Tage. Die notwendige Magnitude für die Auslösung eines Ereignisses hängt dabei, wie bereits dargelegt, von der sogenannten aktuellen Disposition ab, welche sich aus Grund- und variabler Disposition zusammensetzt (Gamma, 2000).

Bei der Auslösung wird grundsätzlich zwischen einer niederschlagsabhängigen und – unabhängigen Auslösung unterschieden. Nachfolgend wird kurz auf die beiden Arten der Auslösung eingegangen.

2.4.3.1 Niederschlagsabhängige Auslösung

Zur Auslösung von fluviatilem Feststofftransport trägt vielfach ein Niederschlagsereignis bei, welches zur Abflussbildung durch Oberflächenabfluss führt. Dabei fällt der Niederschlag in Form von Regen oder Schnee und Hagel (Rudolf-Miklau und Suda, 2012). Während dem der Schnee und Hagel erst beim Abschmelzen und damit verzögert abflusswirksam wird, kann der flüssig als Regen fallende Niederschlag potentiell unmittelbar durch Oberflächenabfluss zum Abflussanstieg im Gerinne des Gebirgsflusses beitragen. Dies ist dann der Fall, wenn die Niederschlagsintensität die Wasseraufnahmekapazität des Untergrundes übersteigt (Rudolf-Miklau und Suda, 2012).

Es kommt zum Oberflächenabfluss vom Hang ins Gerinne. Auch Zwischenabfluss innerhalb des Bodens kann hochwasserrelevant werden, da hier durch Wurzeln oder Regenwürmer gebildete Makroporen zu einem schnellen Abfluss führen. Der Zwischen- und Oberflächenabfluss von den angrenzenden Talhängen speisen schliesslich entlang des Gerinnes den Hochwasserabfluss (Hegg, 2001).

Eine mögliche Form der niederschlagsabhängigen Auslösung des fluviatilen Feststofftransportes sind kurz andauernde konvektive Starkniederschläge (Burkard, 2005). Diese Art des Niederschlags weist eine relativ hohe Intensität auf, ist aber nur von kurzer Dauer (Gamma, 2000). Aufgrund ihrer kurzen Dauer sind Starkniederschläge vor allem für kleine Gebirgsflusseinzugsgebiete am Übergang zum Wildbach oder in Bezug auf die Wildbäche als Zubringerbäche ins Gebirgsflusssystem relevant. Weiter können sie eine wichtige Rolle für die Auslösung spielen, wenn sie auf Einzugsgebiete mit grossen zusammenhängenden Teilflächen geringen Speichervermögens fallen.

Neben den Starkniederschlägen sind lang anhaltende, advektive Niederschläge mit geringerer Intensität eine weitere Möglichkeit der niederschlagsabhängigen Auslösung eines gefährdenden fluviatilen Feststofftransportes (Zimmermann et al., 1997). Diese Niederschlagsart führt vor allem in Einzugsgebieten mit vielen verzögert reagierenden Teilflächen mit einem grösseren Speichervermögen zur Auslösung, da es einige Zeit in Anspruch nimmt, bis die Böden dort gesättigt sind und es zum direkten Oberflächen- oder Zwischenabfluss ins Gerinne kommt (Burkard, 2005).

2.4.3.2 Niederschlagsunabhängige Auslösung

Der Anstieg des Abflusses bei einem Hochwasser als Voraussetzung für fluviatilen Feststofftransport und Überschwemmungen muss nicht zwingend durch einen Niederschlag ausgelöst werden. Beispiele für die niederschlagsunabhängige Auslösung können etwa der Dambruch bei natürlich oder künstlich gestauten Seen, der Ausbruch von Wassertaschen in Gletschern, Verklausungen an Hindernissen entlang des Gerinnes oder eine intensive Schneeschmelze sein, welche den Boden sättigt und schliesslich zum Oberflächenabfluss führt (Zimmermann et al., 1997). Oft kann nicht eindeutig zwischen niederschlagsabhängiger und – unabhängiger Auslösung unterschieden werden. Dies ist unter anderem dann der Fall, wenn Schneeschmelze im Frühjahr in Kombination mit intensiven Regenfällen auftritt und so zum Hochwasserabfluss beiträgt (Rudolf-Miklau und Suda, 2012).

KAPITEL 3: RISIKO UND VULNERABILITÄT

Trifft ein an sich natürlicher Prozess wie der im vorderen Kapitel soeben beschriebene fluviale Feststofftransport infolge einer Überschwemmung auf menschliche Infrastruktur und Gebäude, kommt es zu Schäden an diesen Risikoelementen. Wie hoch diese Schäden sind, wird durch die sogenannte physische Vulnerabilität der Risikoelemente entscheidend beeinflusst. Die physische Vulnerabilität bestimmt somit auch das Risiko mit.

Die beiden Konzepte des Risikos und der Vulnerabilität stehen in Kapitel 3 im Zentrum und bilden gleichzeitig die theoretische Grundlage dieser Arbeit. Zunächst wird dabei das Risikokonzept näher besprochen, dann wird auf die Vulnerabilität eingegangen. Bei der Vulnerabilität wird zusätzlich auf ihre physische Dimension fokussiert und das gebräuchliche Intensitätskriterium $v \cdot h$ im Zusammenhang mit physischen Vulnerabilitätsanalysen in der Schweiz diskutiert. Zum Schluss werden verschiedene Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität besprochen.



Titelbild von Kapitel 3: Wohngebäude mit verschiedenen betroffenen Gebäudeelementen nach der Einwirkung durch eine feststoffführende Überschwemmung (Photograph unbekannt).

3.1 Das Risikokonzept

Beim Risikobegriff kann grundsätzlich zwischen einer naturwissenschaftlichen und eine sozialwissenschaftlichen Definition unterschieden werden (Glade, 2007). Da die vorliegende Arbeit mit einem naturwissenschaftlichen Hintergrund entstanden ist, wird im Folgenden ausschliesslich auf die naturwissenschaftliche Definition des Risikokonzeptes eingegangen.

Risiko im naturwissenschaftlichen-technischen Sinn ist nach Varnes (1984) in Bezug auf Naturgefahren als Funktion einer Naturgefahr (H) und den daraus resultierenden Konsequenzen (C) definiert und kann in CHF oder jeder anderen Währung folgendermassen charakterisiert werden:

$$R = H * C \quad (2)$$

mit

R	Risiko	[CHF]
H	Naturgefahr (Hazard)	[]
C	Konsequenzen (Consequences)	[CHF]

Die Naturgefahr stellt dabei ein potentiell für den Menschen schadenbringendes Ereignis dar. Dieses Ereignis ist durch eine bestimmte Eintretenswahrscheinlichkeit, Magnitude und einen abgegrenzten Wirkungsraum definiert (Guzetti et al., 1999). Per Definition wird der an sich natürlich ablaufende Prozess, welcher nach Glade und Pöpl (2013) als Naturereignis bezeichnet wird, dabei erst durch die schadenbringenden Interaktion mit menschlicher Infrastruktur zur Naturgefahr (Steuer, 1979). Die Überschwemmung eines Gebirgsflusses mit Feststofftransport ist per se also eigentlich ein Naturereignis, welches erst beim schadenbringenden Aufeinandertreffen mit Risikoelementen wie menschlicher Infrastruktur zur Naturgefahr wird. Risikoelemente werden nach Glade und Pöpl (2013) als Wertattribute wie Häuser, Infrastruktur, landwirtschaftliche Flächen oder Menschen charakterisiert.

Die Konsequenzen sind im ökonomischen Sinn mit einem Geldwert in CHF quantifizierbar und vom Wert der Vulnerabilität und der Präsenzwahrscheinlichkeit des Risikoelements abhängig. Die oben eingeführte Ausgangsformel kann dementsprechend als Funktion der folgenden Faktoren nach Andrecs und Oberndorfer (2008) erweitert werden:

$$R_{j,i} = f(p_{si}, A_{oj}, p_{oj,si}, v_{oj,si}) \quad (3)$$

mit:

$R_{j,i}$:	Risiko, abhängig von Szenario i und Objekt j	[CHF]
p_{si} :	Eintretenswahrscheinlichkeit von Szenario i mit einer bestimmten Magnitude []	[]
A_{oj} :	Wert von Objekt j	[CHF]
$p_{oj,si}$:	Präsenzwahrscheinlichkeit von Objekt j bei Szenario i	[]
$v_{oj,si}$:	Vulnerabilität von Objekt j, abhängig von Szenario i.	[]

Die Eintretenswahrscheinlichkeit und Magnitude von Szenario i, definiert die Naturgefahr. Der Wert, die Präsenzwahrscheinlichkeit und zu einem Teil die Vulnerabilität sind dabei objektinhärent und steuern die Konsequenzen eines ablaufenden Naturgefahrenprozesses. Eine Risikoreduktion kann demnach also sowohl von der einwirkenden Seite der Naturgefahr, als auch von Seiten der potentiell betroffenen Objekte angestrebt werden (Andrecs und Oberndorfer, 2008).

3.2 Vulnerabilität

In den vergangenen Jahren erfreute sich der Begriff Vulnerabilität in der Forschung im Zusammenhang mit Naturgefahren und Klimawandel wachsender Popularität (Fuchs et al., 2011). Wie bereits beim Risiko gibt es auch beim Begriff der Vulnerabilität eine sozialwissenschaftliche und eine naturwissenschaftliche Sichtweise, was die Begriffsdefinition teilweise unscharf und vieldeutig macht. So listete allein Thywissen (2006) 36 verschiedene Definitionen von Vulnerabilität aus verschiedenen Publikationen auf.

Grundsätzlich fokussieren Sozialwissenschaftler in Bezug auf Vulnerabilität eher auf die Charakteristiken der Gesellschaft, während Naturwissenschaftler und Techniker sich eher mit der Vulnerabilität von menschlicher Infrastruktur und Gebäuden auseinandersetzen (Papathoma-Köhle et al., 2012a). Diese unterschiedlichen Sichtweisen auf den Vulnerabilitätsbegriff manifestieren sich in den unterschiedlichen Dimensionen von Vulnerabilität, wie etwa der sozialen, der ökonomischen, der institutionellen oder der physischen (strukturellen) Vulnerabilität. Auch wenn sich die Definitionen der einzelnen Vulnerabilitätsdimensionen voneinander unterscheiden, sind sie doch miteinander verknüpft. So kann beispielsweise die physische Vulnerabilität als Voraussetzung gesehen werden, welche einen Einfluss auf alle anderen Dimensionen von Vulnerabilität nimmt (Fuchs, 2009). Als gemeinsamer Nenner der Definitionen der einzelnen Vulnerabilitätsdimensionen gibt Fuchs et al. (2011) an, dass Vulnerabilität als Konzept verstanden wird, welches es erlaubt, die Wirkung von Naturgefahren zu berücksichtigen und nicht nur die Naturgefahr selbst.

Da eine gemeinsame Definition der einzelnen Vulnerabilitätsdimensionen Gegenstand der aktuellen Forschung ist (vgl. Fuchs et al., 2011) und in dieser Arbeit die physische Vulnerabilität im Vordergrund steht, wird nachfolgend ausschliesslich auf die physische (strukturelle) Dimension der Vulnerabilität näher eingegangen.

3.2.1 Physische Vulnerabilität

Die physische Vulnerabilität wird nach UNDRO (1984) als „*the degree of loss to a given element, or set of elements, within the area affected by a hazard*“ bezeichnet. Totschnig und Fuchs (2013) bringen in ihrer Definition zusätzlich den Bezug zur Prozessintensität des Naturgefahrenprozesses hinein und charakterisieren physische Vulnerabilität als Verhältnis des *degree of loss* und der schadenverursachenden Prozessintensität der Naturgefahr.

Der *degree of loss* ist dabei meist als dimensionsloser Quotient des monetär entstandenen Sachschadens und den Wiederaufbaukosten des unversehrten Risikoelements definiert (Fuchs et al., 2012) und kann gemäss Buckle et al. (2000) Werte zwischen 0 (kein Schaden) bis 1 (Totalschaden) annehmen. Der Quotient gibt also mit anderen Worten die Höhe des Anteils am gesamten Gebäudewert an, welcher aufgrund der Einwirkung einer Naturgefahr vernichtet wird. Den Wiederaufbaukosten des Risikoelementes vor der Schädigung durch die Naturgefahr kommt dabei dessen monetärer Sachwert gleich.

$$\text{degree of loss } [] = \frac{\text{Sachschaden CHF}}{\text{Wiederaufbaukosten CHF}} \quad (4)$$

Für den Begriff *degree of loss* werden in der deutschen Literatur synonym wahlweise die Termini Schadenlast (Totschnig und Fuchs, 2012) oder Schadenempfindlichkeit (Romang, 2004) verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Schadenempfindlichkeit in Anlehnung an Borters (1999a und 1999b) Methodenleitfaden für die Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren des BUWAL be-

nutzt. Die Schadenempfindlichkeit bestimmt entsprechend der oben genannten Formel gemäss Romang (2004): den „... Anteil der vorhandenen Werte, welche durch ein konkretes Ereignis tatsächlich in Mitleidenschaft gezogen würden, und geht somit direkt in die Risikoberechnung ein“.

3.2.2 Vulnerabilitätsfunktionen und statistische Masszahlen der Vulnerabilität

Zur Analyse der physischen Vulnerabilität eines Risikoelementes gegenüber Überschwemmungen mit fluvialem Feststofftransport wird häufig ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Schadenempfindlichkeit und der Prozessintensität gesucht. Der Zusammenhang kann dabei entweder als statistische Masszahl wie beispielsweise als Median für einen bestimmten Intensitätsbereich (Intensitätsklasse) oder als Vulnerabilitätsfunktion ausgedrückt werden. Derartige Vulnerabilitätsfunktionen werden mit der jeweiligen Prozessintensität der Naturgefahr auf der X- und der Schadenempfindlichkeit auf der Y- Achse dargestellt. Da die Bauweise und Bauqualität eines Gebäudes (Risikoelement) einen wichtigen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit hat, werden Vulnerabilitätsfunktionen und statistische Masszahlen meist nur für einen Gebäudetyp erstellt und sind ausschliesslich innerhalb einer bestimmten Region mit vergleichbarer Bauweise anwendbar (Papathoma-Köhle, 2012a).

Mit einer robusten Vulnerabilitätsfunktion oder statistischen Masszahlen pro Intensitätsklasse liesse sich bei definierter Prozessintensität über die definierte Schadenempfindlichkeit das Risiko monetär für einen Gebäudetyp quantifizieren, indem man die gefundene Schadenempfindlichkeit mit dem monetären Wert des Risikoelements multipliziert. Ein mögliches methodische Vorgehen zur Herleitung einer solchen Vulnerabilitätsfunktion kann nach Fuchs et al. (2012) wie folgt graphisch dargestellt werden (Abbildung 20).

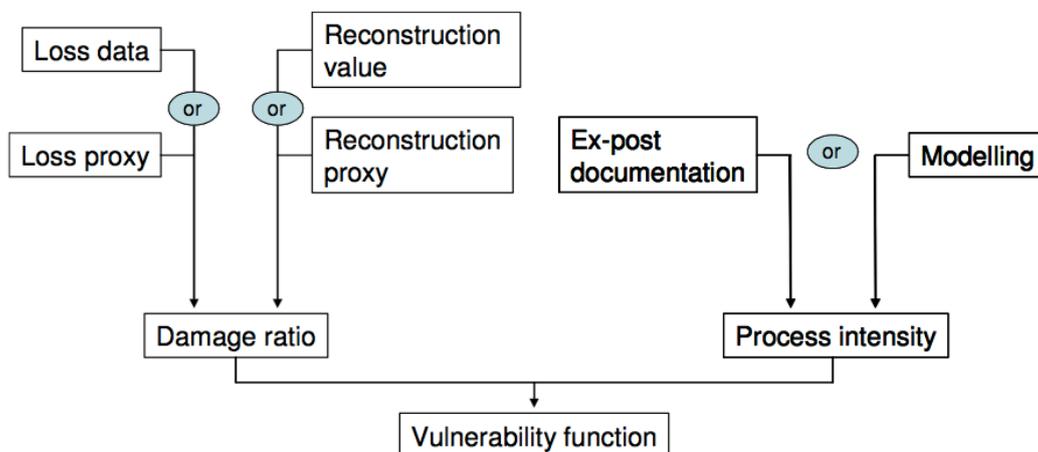


Abbildung 20: Methodischer Vorschlag für die Herleitung einer Vulnerabilitätsfunktion nach Fuchs et al. (2012).

Dabei geht es im Wesentlichen um die Verknüpfung der Schadenempfindlichkeit (*Damage ratio*) und der Prozessintensität. Wie in 3.2.1 beschrieben, wird die Schadenempfindlichkeit als dimensionsloser Quotient aus dem Sachschaden und den Wiederaufbaukosten bestimmt. Der Sachschaden und die Wiederaufbaukosten können dabei anhand des Schadenbildes im Nachhinein über Proxies wie Fixpreise pro m³ oder m² abgeschätzt werden oder werden als Datengrundlage von der Assekuranz oder der betroffenen Gemeinde geliefert. Auf die schadensverursachende Prozessintensität kann mit Hilfe von Bild-/Schriftdokumenten oder Befragungen geschlossen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Beschaffung von Intensitätswerten bildet die Nachsimulation und anschliessende Kalibrierung von Ereignissen mit entsprechender Software, wie es in der vorliegenden Arbeit gemacht wird.

Das Vorgehen bei der Herleitung von statistischen Vulnerabilitäts-Masszahlen ist grundsätzlich vergleichbar mit der in Abbildung 20 dargestellten Methode. Im Gegensatz zu Vulnerabilitätsfunktionen werden die rekonstruierten Intensitätswerte hingegen anhand eines Klassierungssystems für bestimmte Intensitätsintervalle gruppiert. Statistische Masszahlen werden anschliessend jeweils nur mit den dazugehörigen Schadenempfindlichkeitswerten für jede einzelne Intensitätsklasse bestimmt.

3.2.2.1 Intensitätskriterium $v \cdot h$ nach Loat und Petraschek (1997)

Für Vulnerabilitätsfunktionen von dynamischen, feststoffführenden Überschwemmungen sind grundsätzlich verschiedene Intensitätskriterien denkbar. Wie in Kapitel 1.2 bereits besprochen, ist dabei das Proxy der Ablagerungshöhe das am häufigsten verwendete Kriterium im Zusammenhang mit der Intensität. Bei der Herleitung von statistischen Kennzahlen pro Intensitätsklasse wird vor allem im schweizerischen Kontext oft das Produkt aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit als Intensitätskriterium nach Loat und Petraschek (1997) verwendet. Dieses Intensitätsproxy wird bei der Gefahrenanalyse in der Schweiz heute in der Praxis angewendet. Die auf Simulationen basierenden Intensitäten werden dabei gemäss Tabelle 1 in den 3 Klassen $< 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$, $0.5 - 2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ und $> 2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ auf Intensitätskarten festgehalten und gelten als Grundlage für die Gefahrenkartierung in der Schweiz.

Die physikalisch, hydraulische Begründung des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ liegt dabei, wie bereits erwähnt, nicht primär in der schadenverursachenden Wirkung auf Gebäude, sondern mehr in der Gefährdung von Menschen. Unter Vernachlässigung des Auftriebs wirkt auf eine Person in strömendem Wasser nämlich die dynamische Strömungskraft des Wassers F_D als treibende Kraft. Die Gewichtskraft der Person wirkt als rückhaltende Kraft wie in Abbildung 21 dargestellt.

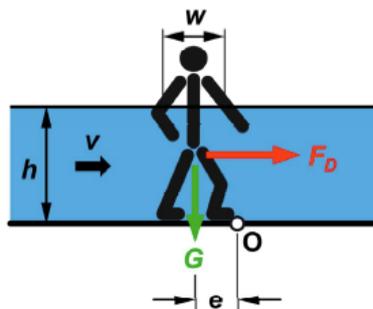


Abbildung 21: Rückhaltende Gewichtskraft G und treibende Kraft F_D , welche auf eine in einer Wasserströmung mit Fliesstiefe h und Fließgeschwindigkeit v stehende Person einwirkt (Bezzola, 2011).

Die treibende Strömungskraft des Wassers (F_D) ist dabei folgendermassen definiert:

$$F_D = \rho \frac{v^2}{2} C_D h w \quad (5)$$

mit

F_D	Treibende Strömungskraft des Wassers	[N]
ρ	Dichte des Wasser-Feststoffgemisches	[kg/m ³]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
C_D	Dimensionsloser Koeffizient	[]
h	Fliesstiefe	[m]
w	Schulterbreite der Person	[m]

Die rückhaltende Gewichtskraft ist durch die Masse m der Person und die Erdbeschleunigung wie folgt definiert:

$$F_R = mg \quad (6)$$

mit

F_R	Rückhaltende Gewichtskraft der Person	[N]
m	Masse der Person	[kg]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]

Es ergeben sich folgende Momente für die treibende Strömungskraft und die rückhaltende Gewichtskraft:

$$M_D \approx F_D \frac{h}{2} = \frac{\rho}{4} C_D w (vh)^2 \quad (7)$$

mit

M_D	Treibendes Moment	[Nm]
F_D	Treibende Strömungskraft	[N]
h	Fliesstiefe	[m]
ρ	Dichte des Wasser-Feststoffgemisches	[kg/m ³]
C_D	Dimensionslose Konstante	[]
w	Schulterbreite der Person	[m]
v	Fliessgeschwindigkeit	[m/s]
h	Fliesstiefe	[m]

$$M_R = Ge \quad (8)$$

mit

M_R	Rückhaltendes Moment	[Nm]
F_D	Rückhaltende Gewichtskraft	[N]
e	Exzentrizität	[m]

Im Gleichgewichtszustand entspricht gemäss Formel 9 das treibende Moment genau dem rückhaltenden Moment. Die Person befindet sich dann in einem kritisch stabilen Zustand. Jegliche Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit oder Wassertiefe würde dazu führen, dass die Person von der Strömung weggespült würde.

$$M_D = M_R \quad (9)$$

mit

M_D	Treibendes Moment [Nm]
M_R	Rückhaltendes Moment [Nm]

Löst man die Gleichung mit den beiden Momenten nun nach dem Produkt aus Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe auf, erhält die kritische Fliessgeschwindigkeit und Wassertiefe bei welcher eine im Wasser stehende Person gerade noch stabil stehen kann:

$$vh = \sqrt{\frac{G \cdot e}{\frac{\rho}{4} \cdot C_D \cdot w}} \quad (10)$$

mit

v	Fliessgeschwindigkeit	[m/s]
h	Fliesstiefe	[m]
G	Gewichtskraft	[N]
e	Exzentrizität	[m]
ρ	Dichte des Wasser-Feststoffgemisches	[kg/m ³]
C_D	Dimensionslose Konstante	[]
w	Schulterbreite der Person	[m]

Berechnet man nun mit obiger Formel das kritische Produkt aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit für eine durchschnittliche Person mit einem Gewicht von 75 kg, $w = 0.5$ m, $\rho = 1000$ kg/m³, $C_D = 1.0$ und $e = 0.4$ m dann ergibt sich für $v \cdot h$ ein Produkt von 0.49 m²/s (Bezzola, 2011). Bis zu einem $v \cdot h$ -Wert von 0.49 m²/s kann eine 75 kg schwere Person mit einer Schulterbreite von 0.5 m also kritisch stabil in einer Strömung stehen, wird der $v \cdot h$ -Wert grösser, droht sie mitgerissen zu werden und kann unter Umständen ertrinken. 0.5 m²/s entspricht aus diesem Grund wie in Tabelle 1 dargestellt genau der Klassengrenze zwischen schwacher (< 0.5 m²/s) und mittlerer (0.5 m²/s - 2.0 m²/s) Intensität nach Loat und Petraschek (1997). Ab einer Wassertiefe von 2 m ergibt sich auch bei einer per Definition minimalen Fliessgeschwindigkeit einer dynamischen Überschwemmung von 1 m/s (Egli, 2007) allein durch die Wasserhöhe, welche die menschliche Körpergrösse zu meist übersteigt, die Möglichkeit des Ertrinkens. Aus diesem Grund wird gemäss Loat und Petraschek (1997) in Tabelle 1 ab einem Produkt aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit von > 2 m²/s von starker Intensität gesprochen.

Abgestützt auf die Grundlage dieses Klassierungssystems für dynamische Überschwemmungen nach Loat und Petraschek (1997) wurden vor allem in der Schweiz im Zusammenhang mit Vulnerabilitätsanalysen mit $v \cdot h$ als Proxy für die Intensität gearbeitet (Borter, 1999a; Kimmerle, 2002; Romang, 2004; Spichtig und Bründl, 2008).

3.3 Gebäudevulnerabilität gegenüber dynamischen Überschwemmungen

Bei der Interaktion einer dynamischen Überschwemmung mit menschlicher Infrastruktur und Gebäuden entlang der Fliessstrecke entstehen Schäden an diesen Risikoelementen. Die Höhe des eintretenden Schadens wird dabei mitunter durch die Schadenempfindlichkeit des Gebäudes oder der Infrastruktur gegenüber bestimmten Intensitätswerten des Überschwemmungsprozesses (Vulnerabilität) beeinflusst.

Gemäss Kimmerle (2002) haben sowohl Prozess-, Objekt- als auch Umgebungsparameter einen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit und damit auf die physische Vulnerabilität eines Gebäudes gegenüber dynamischen Überschwemmungen. Kimmerle (2002) definierte im Zusammenhang mit Murgängen für jeden dieser Parameter eine Reihe quantitativer und zum Teil qualitativer Einflussgrössen, welche in der Tabelle 7 dargestellt sind. Da Überschwemmungen mit fluvialem Feststofftransport ebenfalls dynamisch auf ein Gebäude einwirken, kann davon ausgegangen werden, dass die Gebäudevulnerabilität gegenüber dynamischen Überschwemmungen von ähnlichen Faktoren beeinflusst wird.

Tabelle 7: Prozess-, Objekt- und Umgebungsparameter welche einen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit haben (Kimmerle (2002); für feststoffführende Überschwemmungen angepasst).

Prozessparameter	Objektparameter
Quantitativ: <ul style="list-style-type: none"> • Fließgeschwindigkeit [m/s] • Fliesstiefe [m] • Ablagerungshöhe [m] • Stauhöhe am Gebäude [m] • Dichte des Wasser-Feststoffgemisches [t/m³] • Masse des grössten transportierten Blocks [t] • Druck [kN/m³] • Statischer Ersatzdruck einer Einzel- last (Anprall) [kN/m²] • Statische Ersatzkraft einer Einzel- kraft (Anprall) [kN] 	Qualitativ: <ul style="list-style-type: none"> • Wasserdichtigkeit • Festigkeit/Stabilität bzgl. Druckeinwirkung • Bruchverhalten • Einspannung • Gebäudeform • Öffnungen • Objektschutz am Gebäude Quantitativ: <ul style="list-style-type: none"> • Höhe der Festigkeit des Gebäudes [m] • Höhe der Wasserdichtigkeit [m] • Länge der betroffenen Gebäudewand [m] • Dicke der Gebäudewand [m] • Spannweite der Gebäudewand [m] • Einbindetiefe der Baute in den Untergrund [m] • Maximale Durchbiegung [mm]
Umgebungsparameter	
Qualitativ: <ul style="list-style-type: none"> • Topographie • Art des Prozessweges • Rauigkeit des Prozessweges • Objektschutz vor dem Gebäude Quantitativ: <ul style="list-style-type: none"> • Neigung [°] 	

3.3.1 Prozessparameter

Die Prozessparameter umfassen quantitative, physikalische Kennwerte der Einwirkung des Überschwemmungsprozesses auf das Gebäude. Beispiele dafür sind etwa die Fliesstiefe, die Dichte des Fluid-/Feststoffgemisches oder die Masse des grössten mitgeführten Feststoffpartikels. Die schädigende Einwirkung auf das Gebäude kann dabei in sogenannten Gefährdungsbildern zusammengefasst werden.

Ein erstes Gefährdungsbild gegenüber dynamischen Überschwemmungen ergibt sich durch den Strömungsdruck des anströmenden Wassers auf die Gebäudewand. Dabei setzt sich der Strömungsdruck aus hydrodynamischer Beanspruchung q_f (auch Staudruck genannt) und der hydrostatischen Beanspruchung q_{hf} zusammen (Rudolf-Miklau und Suda, 2012). Die hydrodynamische Beanspruchung kommt ab Fließgeschwindigkeiten von > 1 m/s zum tragen. Bei geringeren Fließgeschwindigkeiten ist die hydrodynamische Beanspruchung vernachlässigbar (Egli, 2007). Nach Egli (2007) kann die dynamische Beanspruchung durch das anströmende Wasser wie folgt quantifiziert werden:

$$q_f = 0.5c_d\rho v^2 \quad (11)$$

mit

q_f	Hydrodynamische Beanspruchung		[kN/m ²]
c_d	Wenn angeströmte Wandlänge/Überschwemmungstiefe < 40 :	1.25 – 1.50	[]
	Wenn angeströmte Wandlänge/Überschwemmungstiefe > 40 :	1.50 – 2.00	[]
ρ	Dichte des Wasser-Feststoffgemisches		[t/m ³]
v	Fliessgeschwindigkeit		[m/s]

Neben der hydrodynamischen Beanspruchung des Gebäudes ergibt sich aus der anströmenden Wassersäule ebenfalls ein hydrostatischer Druck q_{hf} als weitere Komponente des Strömungsdruckes. Gemäss Egli (2007) handelt es sich bei hydrostatischem Druck von unten auf die Bodenplatte eines Gebäudes um Auftrieb. Die Einwirkung aus der hydrostatischen Beanspruchung lässt sich wie folgt berechnen:

$$q_{hf} = \rho_{hw}gh \quad (12)$$

mit

q_{hf}	Hydrostatische Beanspruchung		[kN/m ²]
ρ_{hw}	Dichte von Hochwasser mit wenig Feststoffanteilen	1.1	[t/m ³]
	Dichte von Hochwasser mit viel Feststoffanteilen	1.4	[t/m ³]
g	9.81		[m/s ²]
h	Fliesstiefe		[m]

Durch das dynamische Anströmen des Wassers kann es als weiteres Gefährdungsbild auch zum Anprall mitgeführter Feststoffe wie Baumstämmen oder Geschiebe an die Gebäudewand kommen (Egli, 2007). Diese Einwirkung ist abhängig von der kinetischen Energie der im Wasser anströmenden Feststoffe und berechnet sich wie folgt:

$$e_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad (13)$$

mit

e_{kin}	kinetische Energie	[J]
m	Masse des anprallenden Objektes	[kg]
v	Anprallgeschwindigkeit	[m/s]

Die Anprallgeschwindigkeit entspricht ausschliesslich beim Transport von schwimmenden Objekten wie Schwemmholz der Fliessgeschwindigkeit. Die Anprallgeschwindigkeit von Geschiebe ist geringer als die Fliessgeschwindigkeit des Wassers.

Ein weiteres Gefährdungsbild wird als dynamische Überschwemmung mit Feststofferosion (Kolk) bezeichnet. Auch hier können Feststoffe wieder auf die Gebäudehülle aufprallen und diese so beschädigen. Zusätzlich dazu sind aber auch Erosionserscheinungen und Kolkbildungen möglich, was zur Unterspülung des Fundaments oder der Destabilisierung von Böschungen (Rudolf-Miklau und Suda, 2012) führen kann. Dies vor allem bei hohen Fliessgeschwindigkeiten (>2m/s) entlang stark kanalisierter Abflusswege wie Strassenzügen oder im Fall von Böschungen in Form von Seitenerosion unmittelbar angrenzend ans Gerinne (Egli, 2007). Die Kolktiefe kann nach Kohli (1998) detailliert anhand

der Fließgeschwindigkeit, Überschwemmungstiefe, Überschwemmungsdauer und der Kornverteilung berechnet werden. Auf vertiefte Ausführungen wird an dieser Stelle verzichtet, da das Gefährdungsbild der Kolkbildung bei der vorliegenden Vulnerabilitätsanalyse in der Folge nicht berücksichtigt wird.

Eine weitere Gefährdung kann von der Auflast von abgelagerten Feststoffen auf Gebäudeteile ausgehen. Die Auflast kann als Druck folgendermassen berechnet werden (Egli, 2007):

$$q_a = \rho_a g h_a \quad (14)$$

mit

q_a	Auflast infolge Feststoffablagerungen	[kN/m ²]
ρ_a	Dichte der Feststoffablagerungen. Richtwert: 2.0	[t/m ³]
g	9.81	[m/s ²]
h_a	Höhe der Feststoffablagerungen	[m]

Schliesslich führt auch das reine Eindringen von Wasser und Feststoffen durch Öffnungen in der Gebäudehülle oder die undichte Gebäudehülle selbst zu Schäden durch Vernässung und Schmutzeinlagerung im Gebäudeinneren.

In der Abbildung 22 werden alle beschriebenen physikalischen Einwirkungen graphisch zusammengefasst und dargestellt.

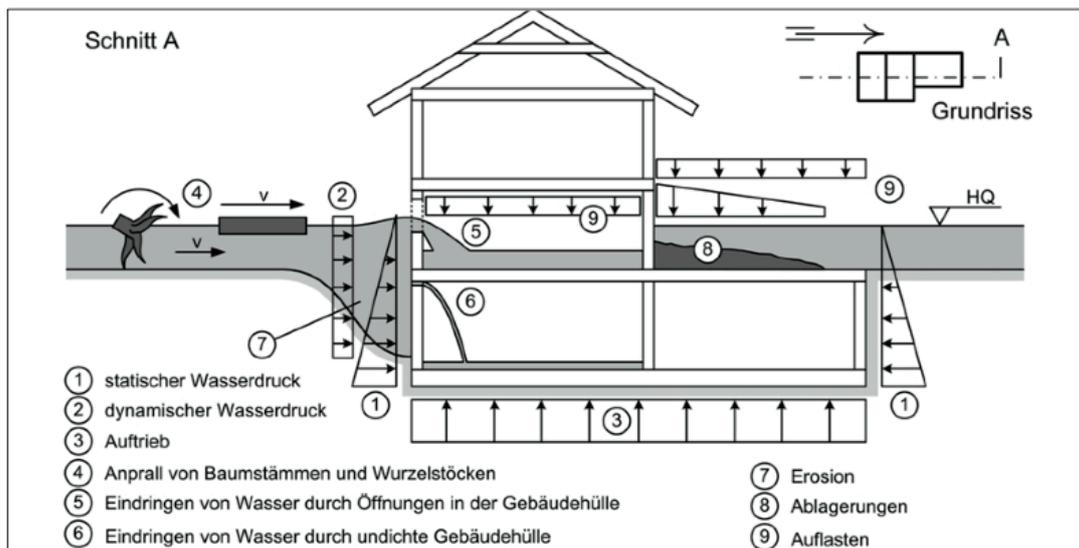


Abbildung 22: Gefährdungen durch dynamische, feststoffführende Überschwemmungen nach Rudolf-Miklau et al. (2011).

Die beschriebenen Gefährdungsbilder und ihr Einwirkungen führen zu Schäden an der Gebäudehülle durch Anprall und Wasserdruck, Verlust der Standsicherheit durch Unterkolkung und Erosion sowie das Eindringen von Wasser und Feststoffen ins Gebäudeinnere (Rudolf-Miklau und Suda, 2012). Daraus resultierende Schmutzablagerungen und Vernässung führen vor allem im Innern des Gebäudes zu Schäden an Böden, Wänden, der Decke, Installationen und dem Gebäudeinventar.

3.3.2 Objektparameter

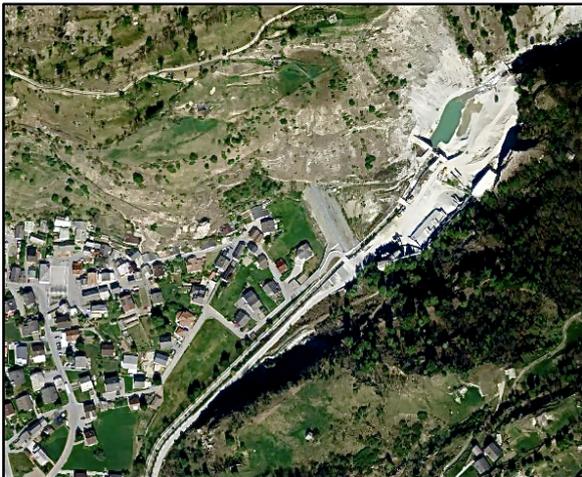
Objektparameter sind auf das Risikoelement bezogene Charakteristika, welche durch den Bautyp, verwendete Baumaterialien und den Erhaltungszustand beeinflusst werden (Fell, 1994; Fell und Hartford, 1997; Holub und Hübl, 2008). In Tabelle 7 findet sich eine Auflistung von Beispielen wie etwa der Höhe der Wasserdichtigkeit eines Gebäudes (Kimmerle, 2002). Dieser objektspezifische Einflussfaktor der Wasserdichtigkeit eines Gebäudes manifestiert sich vor allem bei Gebäudeöffnungen im Zusammenspiel mit dem Prozessparameter der Fließhöhe. Ist die Fließhöhe einer Überschwemmung genügend hoch, können beispielsweise Fenster eingedrückt werden, wodurch die an sich relativ wasserdichte Gebäudehülle durch Wasser und Feststoffe überwunden wird. In der Folge kommt es auch zu Schäden im Gebäudeinneren. Dieser Umstand scheint sich auch in Vulnerabilitätsfunktionen niederzuschlagen. So machen Fuchs et al. (2007) Gebäudeöffnungen für die grosse Variabilität der Schadenempfindlichkeit im Intensitätsbereich zwischen 1 m und 1.5 m Ablagerungshöhe verantwortlich.

3.3.3 Umgebungsparameter

Schliesslich kann die unmittelbare Umgebung um das Risikoelement nach Kimmerle (2002) ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf seine physische Vulnerabilität nehmen. So können Bäume und Hecken um das Gebäude beispielsweise die Rauigkeit entlang des Prozessweges erhöhen und Prozessparameter wie die Fließgeschwindigkeit möglicherweise mitbeeinflussen, was schliesslich wieder einen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit, die physische Vulnerabilität und somit nicht zuletzt auch wieder auf das Risiko nimmt. Weiter können Objektschutzmassnahmen wie eine Abschirmung des Gebäudes vom Wasser durch Barrieren oder eine Höherlegung des Gebäudes die Vulnerabilität reduzieren (Holub et al., 2012).

KAPITEL 4: UNTERSUCHUNGSSTANDORT

Im folgenden Kapitel soll der Untersuchungsstandort und das Überschwemmungsereignis, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen beschrieben werden. Dabei wird zunächst kurz das Einzugsgebiet des Baltschiederbachs und das Dorf Baltschieder als Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit charakterisiert. Anschliessend wird vertieft auf den Ereignisablauf vom 15. Oktober 2000 eingegangen. Zum Abschluss werden noch allgemeine Charakteristika der durch die Überschwemmung betroffenen Wohngebäude in Baltschieder näher besprochen.



Titelbild von Kapitel 4: Das Dorf Baltschieder mit Baltschiederbach und Geschieberückhaltebecken und - sperre (© swisstopo).

4.1 Der Baltschiederbach und sein Einzugsgebiet

Der Baltschiederbach wird durch den Innre und Üssre Baltschieder-gletscher gespeist und entspringt dort auf einer Meereshöhe von 3000 m.ü.M (Innre Baltschieder-gletscher) beziehungsweise 2700 m.ü.M (Üssre Baltschieder-gletscher). Der Baltschiederbach fliesst als Gebirgsfluss in südliche Richtung durch das Baltschieder-tal und mündet auf einer Kote von 647 m.ü.M in die Rhone (Badoux und Rickenmann, 2008). Die Rhone bildet gleichzeitig den Vorfluter des Baltschiederbachs. Gesamthaft ist der Baltschiederbach rund 11 km lang und weist entlang seines Längsprofils insgesamt 6 Flachstrecken mit einem Gefälle von < 10% auf. Diese Flachstrecken sind für den Geschiebehaushalt von entscheidender Bedeutung. Im Längsprofil in Abbildung 23 sind die Flachstücke grün markiert. Das Bachbett hat sich im anstehenden Hangschutt nach dem Gletscherrückzug am Ende der letzten Eiszeit gebildet und ist durch Stufen-Becken Strukturen (Whittaker und Jäggi, 1982) und grosse Residualblöcke charakterisiert (Jäggi et al., 2004). Die in Kapitel 2 beschriebene, für Gebirgsflüsse typische Dreiteilung aus Sammelgebiet, Umlagerungsstrecke und Ablagerungsgebiet ist beim Baltschiederbach nicht sehr deutlich ausgeprägt (Nigg et al., 2002).

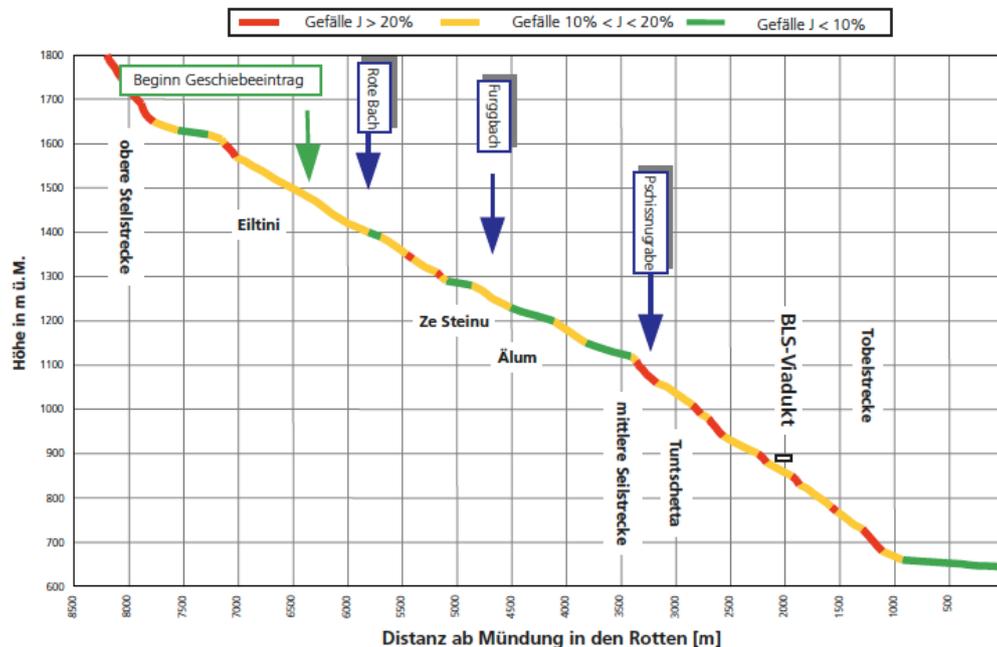


Abbildung 23: Längsprofil des Baltschiederbachs klassiert nach Gerinneneigung mit einmündenden Zubringerbächen (Nigg et al., 2002).

Das Einzugsgebiet ist insgesamt rund 43 km² gross und weist eine mittlere Höhe von 2280 m.ü.M auf. Der überwiegende Teil des Einzugsgebietes besteht mit 52% der Gesamtfläche aus Schutt-, Fels- und Gletscherzonen. Weideland macht 40% des Einzugsgebietes aus und rund 8% bestehen aus Waldflächen (Nigg et al., 2002). Die orographisch rechte Talseite des Einzugsgebietes ist wesentlich steiler als die orographisch linke Seite. Die steilere Talflanke des Baltschieder-tals ist mehrheitlich von Runsen durchsetzt, welche teilweise nur im Niederschlagsfall wasserführend sind. Auf der orographisch linken, flacheren Talseite konnten sich mit dem „Rote Bach“, „Furggbach“ und „Pchissnugrabe“ Seitenbäche entwickeln, die in den Baltschiederbach münden und so Teil des hydrologischen Systems Baltschiederbach werden. Petrologisch wird das Gebiet grösstenteils durch Granite und Grandiorite eines herzynischen Granitkörpers dominiert.

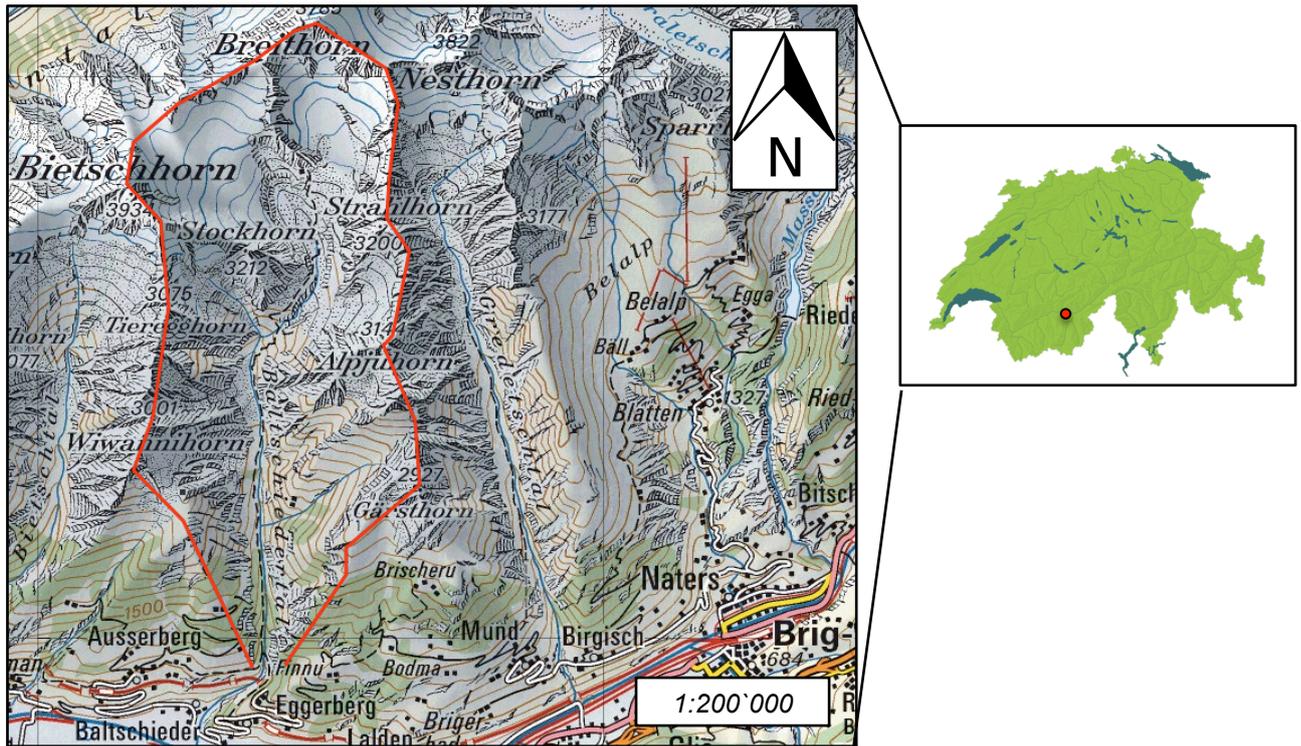


Abbildung 24: Der Baltschiederbach mit rot abgegrenztem Einzugsgebiet (© swisstopo).

4.2 Das Dorf Baltschieder

Das Dorf Baltschieder liegt im Kanton Wallis in der südlichen Schweiz und grenzt an die Stadtgemeinde Visp an. Das Dorf liegt grösstenteils auf dem Schwemmfächer des Baltschiederbachs auf einer Höhe von rund 645 m.ü.M und zählte im Jahr 2000 rund 1100 Einwohner (Biaggi und Zumstein, 2001). Aus der Vergangenheit ist ein kleineres Überschwemmungsereignis aus dem Jahr 1948 bekannt. Die 1930 erbaute Geschieberückhaltesperre am Kegelhals deutet aber auf frühere Ereignisse hin. Wie in anderen alpinen Regionen wurde der Schwemmfächer lange Zeit für Siedlungszwecke gemieden. Erst ab 1980 fand in Baltschieder eine grosse bauliche Entwicklung statt, bei der praktisch der gesamte Schwemmfächer überbaut wurde (Jäggi et al., 2004).

4.3 Wohngebäude in Baltschieder

Bei den 20 in dieser Arbeit einbezogenen Gebäuden in Baltschieder handelt es sich ausschliesslich um Wohngebäude aus dem Versicherungsportfolio der Mobiliar im Jahr 2000. 11 der 20 untersuchten Gebäude sind Einfamilienhäuser, 9 Mehrfamilienhäuser. Die Gebäude weisen alle eine gemäss Totschnig und Fuchs (2012) nach 1950 in den europäischen Alpen typische Ziegelmauerwerk- und Betonbauweise auf. Die Stahlbetonbauweise kann praktisch ausgeschlossen werden. Die kantonale Norm für erdbebensicheres Bauen, welche je nach Baugrundklasse den Verbau von Stahlbeton vorschreibt, ist nämlich erst 4 Jahre nach dem Ereignis 2004 in Kraft getreten (Gsponer, 2005).

Bezüglich weiterer Charakteristika wie der Lage des Gebäudes (erhöht, nicht erhöht) oder der Grösse und Anordnung der Gebäudeöffnungen unterscheiden sich die einzelnen Wohngebäude zum Teil stark voneinander. Hier kommt die hohe Individualität bei der Planung und Ausführung von Wohngebäuden zum tragen.

4.4 Ereignisablauf

Vom 10. bis 16. Oktober 2000 stellte sich im Wallis eine Wetterlage mit einem Tief über dem Mittelmeer und anhaltenden, grossräumigen Niederschlag südlich des Alpenkamms ein. Durch diese Süd-staulage wurden während 7 Tagen feuchte Luftmassen vom Süden gegen die Alpen geführt, was erhebliche Niederschlagsmengen auf der Alpensüdseite und dem angrenzenden Wallis zur Folge hatte. So fielen beispielsweise in Simplon Dorf vom 13. auf den 14. Oktober 500 mm Niederschlag (Hegg et al., 2002). Eine weitere Niederschlagswelle am 14. und 15. Oktober über dem stark gesättigten Böden im Baltschiederatal führte zu einem starken Anschwellen des Baltschiederbachs bis auf einen Maximalwert von 85 bis 105 m³/s (Nigg et al., 2002) mit entsprechendem Feststofftransport. Aufgrund der Gefälle bedingten Abnahme der Transportkapazität wurde das Gerinne des Baltschiederbachs und ein bereits bestehendes Geschieberückhaltebecken allmählich aufgeschottert, was um 6.30 Uhr am Morgen des 15. Oktobers schliesslich zur Ausuferung im Bereich des Kegelhalses beim Dorf Baltschieder führte, nachdem die bestehende Geschieberückhaltesperre komplett aufgefüllt war (Biaggi und Zumstein, 2001). Dank einer raschen Evakuierung der Bevölkerung durch die örtliche Feuerwehr konnten in der Folge glücklicherweise alle betroffenen Personen in Sicherheit gebracht werden (Nellen, 2000).

Der relevante Feststoffeintrag ins Gerinne fand hauptsächlich ab dem Bereich „Eiltini“ auf rund 1600 m.ü.M statt (Nigg et al., 2002). Es kann nämlich davon ausgegangen werden, dass Feststoffe, welche bereits in darüber liegenden Gebieten mobilisiert worden ist, grösstenteils im ausgeprägten Flachstück „Chüemattu“ bereits wieder zur Ablagerung gebracht wurde. Kartierungen im Gelände zeigten, dass vor allem der Furggbach auf der orographisch linken Talseite grosse Mengen an Geschiebe und Schwemmh Holz ins Gerinne des Baltschiederbachs lieferte. Auf der orographisch rechten Talseite ist die Runse Tuntschetta als dominante Feststoffquelle zu nennen, bei welcher praktisch ein gesamter Schuttkegel durch Seitenerosion abtransportiert wurde (Abbildung 25). Insgesamt stammt mit 43% des gesamten Feststoffvolumens der grösste Anteil des Geschiebes von der Sohle oder den unmittelbar angrenzenden Böschungen des Baltschiederbachs, was somit den dominanten Geschiebeherd des Ereignisses darstellt (Jäggi et al., 2004).

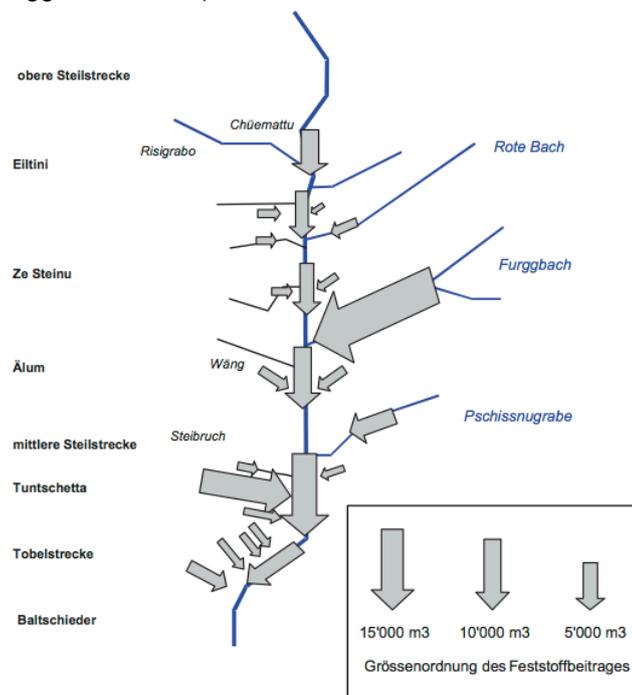


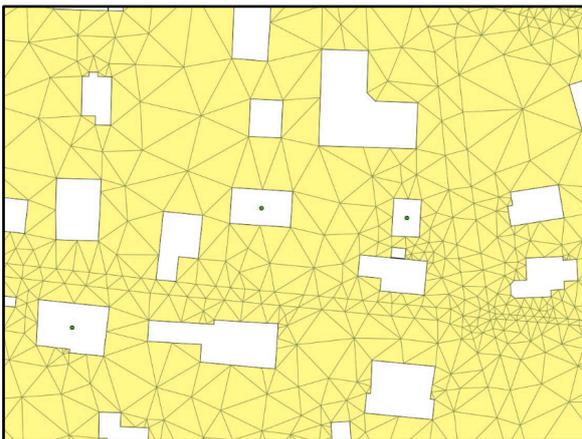
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Feststoffbeiträge während des Ereignisses vom 15. Oktober 2000 entlang des Baltschiederbaches nach Jäggi et al. (2004).

Zur Geschiebekubatur, welche schliesslich infolge der Überschwemmung mit fluvialem Feststofftransport in Baltschieder abgelagert wurde, finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. Unterhalb der bereits im Jahr 2000 bestehenden Geschieberückhaltesperre sind gemäss Schätzungen von Jäggi et al. (2004) zwischen 75000 m³ und 95000 m³ Geschiebe im Dorfbereich abgelagert worden. In der gleichen Studie geben Jäggi et al. (2004) eine auf Rapporten der geräumten Volumen und einer Schätzung der Materialdeponie beruhende Geschiebekubatur von 120'000 m³ an. Die erste Schätzung der Geschiebekubatur von Jäggi et al. (2004) deckt sich einigermassen mit den von Biaggi und Zumstein (2001) angegebenen Werten von 70'000 m³ – 90'000 m³ Geschiebe und 80'000 m³ Feinanteilen (Sand, Schlamm). Nigg et al. (2002) gehen in ihrem Bericht von 70'000 m³ abgelagertem Geschiebe unterhalb der bestehenden Geschieberückhaltesperre aus. Angaben zur Kubatur der Feinanteile werden auch hier keine gemacht.

Nach Abschwellen des Abflusses und mit Hilfe menschlicher Intervention mit Baggern floss der Baltschiederbach schliesslich am 16. Oktober gegen 4.00 Uhr am Morgen über einen provisorischen Kanal wieder in seinem ursprünglichen Gerinne (Biaggi und Zumstein, 2001).

KAPITEL 5: METHODEN

Der Methodenteil dieser Arbeit geht in einem ersten Schritt in Kapitel 5.1 und 5.2 auf das Vorgehen bei der Prozessrekonstruktion und der Bestimmung der Intensitätswerte ein. Anschliessend wird die Herleitung eines auf Schadenverursachung basierenden Intensitätskriteriums und des damit verknüpften Klassierungssystems in 5.3 und 5.4 behandelt. In Kapitel 5.5 wird dann die Verknüpfung von Schadenempfindlichkeit und der rekonstruierten Intensität zur physischen Vulnerabilität beschrieben. In 5.6 ist anschliessend das Vorgehen zum Vergleich der Vulnerabilitätswerte des neu entwickelten Klassierungssystems mit dem Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) das Hauptthema. Das Kapitel Methoden wird schliesslich in 5.7 durch die Beschreibung der Methodik bei der Identifizierung von objekt-, und umgebungsspezifischen Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität abgeschlossen.



Titelbild von Kapitel 5: Ausschnitt aus dem *Quality Mesh* im QGIS mit markierten, betroffenen Gebäuden.

5.1 Simulation

Die Simulation des Ereignisses wird in der hier beschriebenen Methode für die Prozessrekonstruktion der Vulnerabilitätsanalyse verwendet. Für die ex-post Simulation des Ereignisses in Baltschieder und die Rekonstruktion der benötigten Intensitätswerte ist die 2 dimensionale, numerische Simulationssoftware BASEMENT (Vetsch et al., 2013) verwendet worden. BASEMENT wird seit 2002 in der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie entwickelt. Das 2D Modell von BASEMENT beruht im Wesentlichen auf tiefengemittelten Flachwassergleichungen. Dabei wird eine hydrostatische Druckverteilung angenommen, wobei vertikale Geschwindigkeitskomponenten vernachlässigt werden. Der Feststofftransport kann als Schwebstofffracht oder Geschiebe simuliert werden. Der Geschiebetransport wird mit Hilfe von empirischen Formeln und der Schwebstofftransport mit einer Advektions-Diffusions-Gleichung berechnet (Rousselot et al., 2012).

Für die vorliegende Arbeit wurden mit BASEMENT jeweils die Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten über die Dauer des gesamten Ereignisses berechnet. Dabei dienten eine Abfluss- und Geschiebeganlinie, ein digitales Höhenmodell, ein Katasterplan sowie ein in QGIS mit der Erweiterung BASEmesh generiertes Berechnungsgitter als Inputdaten für die Simulation. Mit Hilfe der resultierenden Ablagerungshöhen wurde schliesslich eine Kalibrierung vorgenommen, um so konsistente Fliesstiefen und -geschwindigkeiten zur Bestimmung der Intensitätskriterien zu erhalten. Zusammenfassend kann die Simulation als ein Schritt der Rekonstruktion der Prozessintensitäten wie in Abbildung 26 dargestellt werden. Die Einzelschritte in Abbildung 26 sind jeweils mit Nummern der Kapitel versehen, in welchen detailliert auf das methodische Vorgehen beim jeweiligen Teilschritt eingegangen wird.

SIMULATION

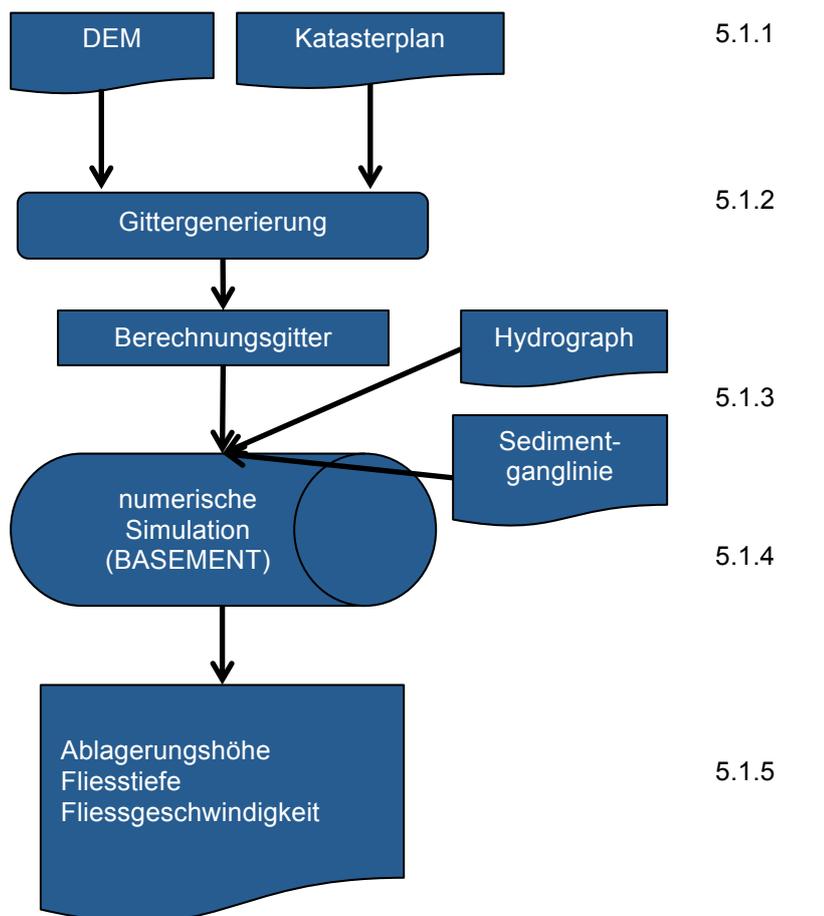


Abbildung 26: Schematisch skizziertes, methodisches Vorgehen zur Simulation mit BASEMENT mit Kapitelangaben der einzelnen Teilschritte.

5.1.1 Grundlagendaten zur Gittererstellung

Als Inputdaten zur Generierung des *Quality meshes* als Berechnungsgitter für die Simulation benötigt man zunächst ein digitales Höhenmodell (DEM) und einen Vektorlayer mit den Aussenkanten der Gebäude, dem Verlauf der Strassenzüge und der Gerinnesohle sowie der Uferdammkrone des Balt-schiederbachs als Bruchkanten.

Für die vorliegende Arbeit ist das Höhenmodell swissALTI^{3D} als Rasterdatei von swisstopo verwendet worden. Dieses Höhenmodell besitzt eine Rastergitter-Maschenweite von 2 m und eine Auflösung in z-Richtung von 0.5 m. Das Höhenmodell swissALTI^{3D} wurde für die Schweiz zwischen 2000 und 2008 mit Hilfe von flugzeuggestütztem Laserscanning erhoben (swisstopo, 2013). Nach dem Ereignis wurde unterhalb des bestehenden Geschieberückhaltebeckens ein weiteres Becken mit Damm gebaut, welches zusätzlich eine Kapazität von 50'000 m³ hat (Jäggi et al., 2004). Dieses neue Geschieberückhaltebecken mit Damm war zum Zeitpunkt der Befliegung für das Höhenmodell swissALTI^{3D} bereits vorhanden und deshalb auf dem Höhenmodell klar ersichtlich (siehe Abbildung 27). Da eine zur Realität möglichst kongruente Nachsimulation der Überschwemmung vom 15. Oktober 2000 das angestrebte Ziel ist, musste der Damm des unteren Geschieberückhaltebeckens manuell aus dem Höhenmodell herausgenommen werden. Das Rückhaltevolumen dieses Damms würde nämlich bei der Nachsimulation des Ereignisses aus dem Jahr 2000 einen grossen Anteil des Geschiebes zurückhalten und so

möglichst akkurate Simulationsergebnisse verunmöglichen. Für die Anpassung des Höhenmodells wurde der Damm des neuen Rückhaltebeckens im GIS ausgeschnitten und die Höheninformation der betroffenen Zellen alle auf 658 m.ü.M gesetzt. Das Gelände wird dadurch auf eine Fläche eingeebnet.

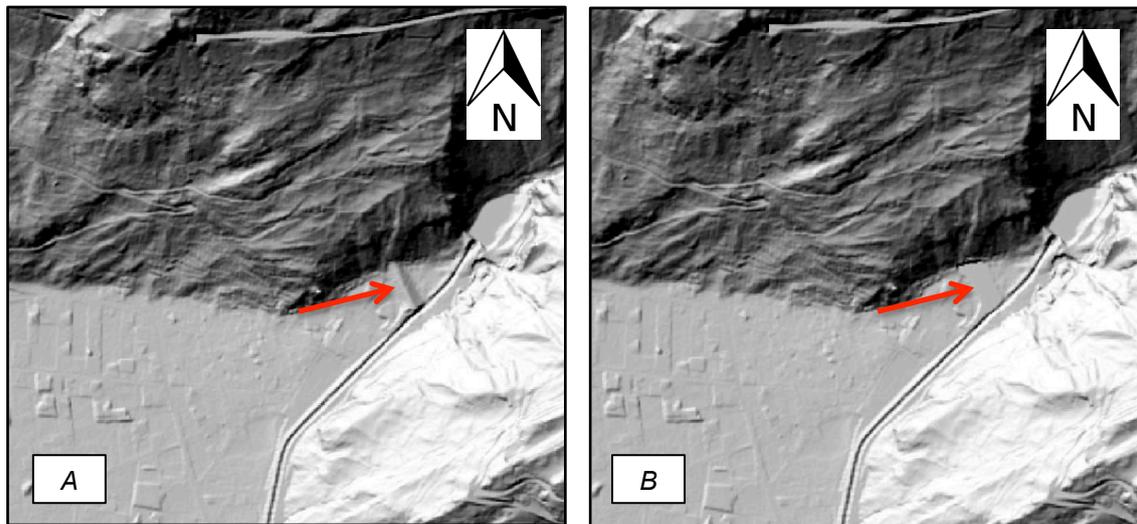


Abbildung 27: Digitales Höhenmodell vor (A) und nachdem (B) der Damm manuell entfernt wurde (siehe jeweils roter Pfeil).

Für den Vektorlayer mit den Bruchkanten der Gebäude und den Strassenverläufen wurde ein Katasterplan von einem Vermessungsbüro als Grundlage verwendet. Dieser war jedoch zu fein aufgelöst und musste zunächst vereinfacht werden.

Die auf dem Katasterplan in Abbildung 28 zusätzlich eingezeichneten Linien der Parzellengrenzen wurden dazu herausgelöscht, da sie im Gelände physisch nicht vorhanden und deshalb keinen Einfluss auf die späteren Fliesswege des Wassers nehmen können. Die Bruchkanten der Gerinnesohle und der Dammkrone des Baltschiederbaches sind auf demselben Layer im QGIS anhand von Luftbildern und dem digitalen Höhenmodell ergänzt worden. Zusätzlich dazu wurden noch eingezeichnete Treppen, Bürgersteige und Misthöfe gelöscht, um die Rechenintensität für die Gittergenerierung zu verringern. Der Einfluss von Treppen, Bürgersteigen und Misthöfen auf die Fliesswege und Ablagerungen des Ereignis kann vernachlässigt werden, da beispielsweise Misthöfe vor Gebäuden vor allem im alten landwirtschaftlich geprägten Dorfteil nahe am Kegelhals vorkommen und meist nicht höher als 0.5 Meter sind. Somit wurden Misthöfe aufgrund der am Kegelhals herrschenden deutlich höheren Fliesshöhen des Überschwemmungsereignisses sowieso überflossen und nahmen so in diesen Bereichen keinen entscheidenden Einfluss auf Fliesswege und Ablagerungen. Ähnliches gilt für Treppen und Bürgersteige. So blieben auf dem Vektorlayer schliesslich nur noch Bruchkanten von Gebäudeumrissen, Strassen, der Gerinnesohle und Dammkronen des Baltschiederbaches übrig (siehe Abbildung 29).

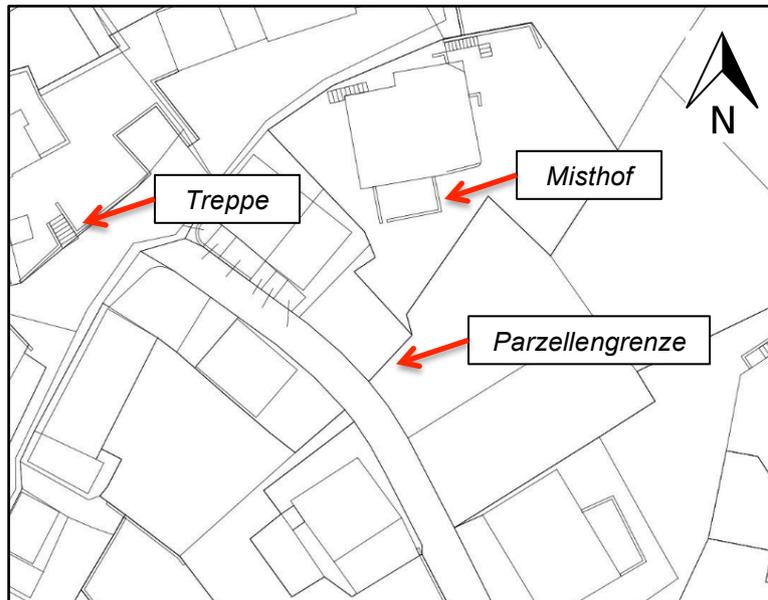


Abbildung 28: Detailansicht des Katasterplans mit eingezeichneten Beispielen von Treppen, Misthöfen und Parzellengrenzen (rote Pfeile), welche für die Simulation aus dem Katasterplan herausgelöscht wurden.

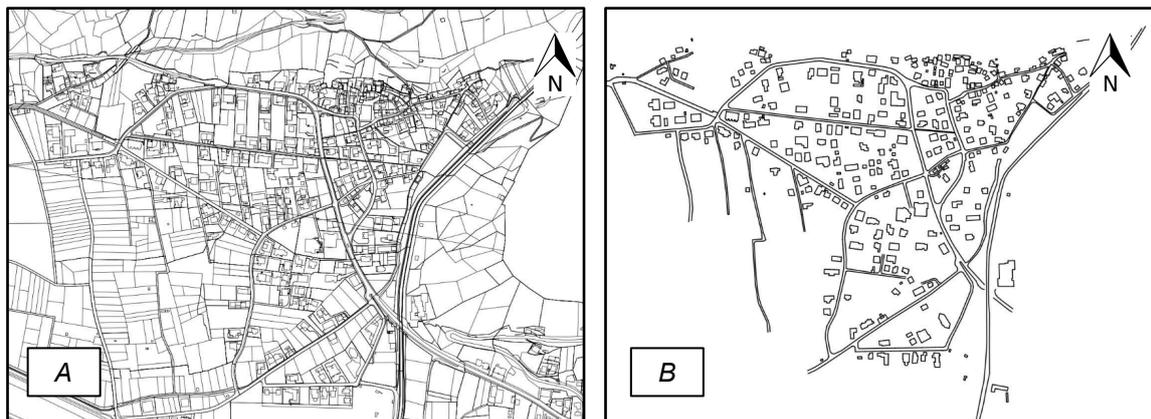


Abbildung 29: Katasterplan vor (A) und nach (B) dem Herauslösen von überflüssigen Bruchkanten wie Parzellengrenzen, Treppen und Misthöfen.

In Bereichen mit in spitzem Winkel aufeinander zulaufenden Bruchkanten werden in der Folge bei der Gittergenerierung extrem kleine Gitternetzelemente erstellt, die sehr rechenintensiv sind. Es wurden deshalb an solchen Stellen im Sinne einer Gitteroptimierung kleine manuelle Anpassungen an den Bruchkanten durchgeführt, die den Effekt von aufeinander in spitzem Winkel zulaufenden Bruchkanten vermindert. Bei diesen Anpassungen handelt es sich aber jeweils um das Verschieben von Bruchkanten um wenige Meter an einzelnen Stellen, so dass kein entscheidender Einfluss auf das gesamte Simulationsergebnis zu erwarten ist.

Neben dem Herauslösen von unnötigen Bruchkanten und der Gitteroptimierung wurde zum Schluss noch ein Wohngebäude im Bereich des herausgenommenen neuen Damms für den Geschieberückhalt ergänzt. Dieses Gebäude wurde nach dem Ereignis im Jahr 2000 zu Gunsten des zusätzlichen Geschieberückhaltebeckens nicht mehr aufgebaut und war deshalb auf dem Katasterplan nicht mehr eingezeichnet. Die Dimensionen und die Lage des Wohngebäudes wurden wie in Abbildung 30 gezeigt anhand von Photos abgeschätzt.

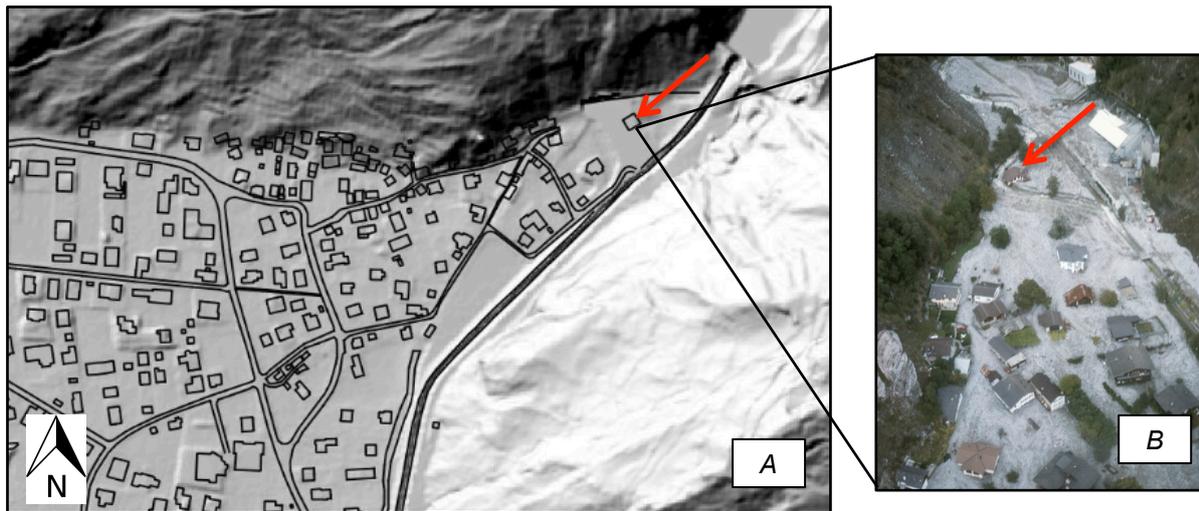


Abbildung 30: A: Standort des nach dem Ereignis im Jahr 2000 zu Gunsten des neuen Geschieberückhaltedammes abgerissenen Gebäudes mit einem roten Pfeil markiert. B: Eines der Photos welches zur Rekonstruktion der Standortes des abgerissenen Wohngebäudes beitrug. Das entsprechende Wohngebäude auf dem Photo ist mit einem roten Pfeil markiert (Photo: Andreas Götz).

5.1.2 Erstellung Berechnungsgitter

Die eigentliche Gittererstellung als Input für die spätere Simulation ist in drei Schritten mit der downloadbaren Erweiterung BASEmesh in QGIS durchgeführt worden. Als erster Schritt wurde das sogenannte *Quality mesh* erstellt. Das *Quality mesh* besteht dabei aus dreieckigen Gitternetzelementen in welchen die Simulationssoftware später jeweils die gewünschten Intensitätsparameter maximale Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit berechnet.

Mit dem oben beschriebenen Höhenmodell und den Bruchkanten des angepassten Katasterplans als Grundlage wurde im QGIS anschliessend ein Vektorlayer als Polygon erstellt, mit welchem die Modellgrenzen festgelegt wurden.

Weiter ist ein sogenannter *Holes Layer* erstellt worden, mit dem Bereiche definiert wurden, welche später bei der Gittergenerierung ausgespart werden. Durch die Platzierung eines Punktes auf diesem Layer innerhalb eines Gebäudes, bleibt der von Bruchkanten umschlossene Bereich innerhalb des Gebäudes frei vom Gitternetz, so dass später bei der Simulation keine Feststoffe durch die Gebäude hindurch fließen oder darin abgelagert werden.

Mit einem weiteren Layer *Area points* kann die Grösse der dreieckigen Gitternetzstellen beeinflusst werden. Wie in Abbildung 31 gezeigt, wurde nur ein *Area point* in den unbebauten, landwirtschaftlich genutzten Wiesenflächen ausserhalb des Dorfes platziert, für welchen die Fläche der einzelnen Gitternetzstellen in diesem Bereich auf 1000 m² begrenzt wurde. Eine feinere Auflösung der Gitternetzstellen in diesem Bereich war nicht nötig, da sich dort keine betroffenen Gebäude befinden.

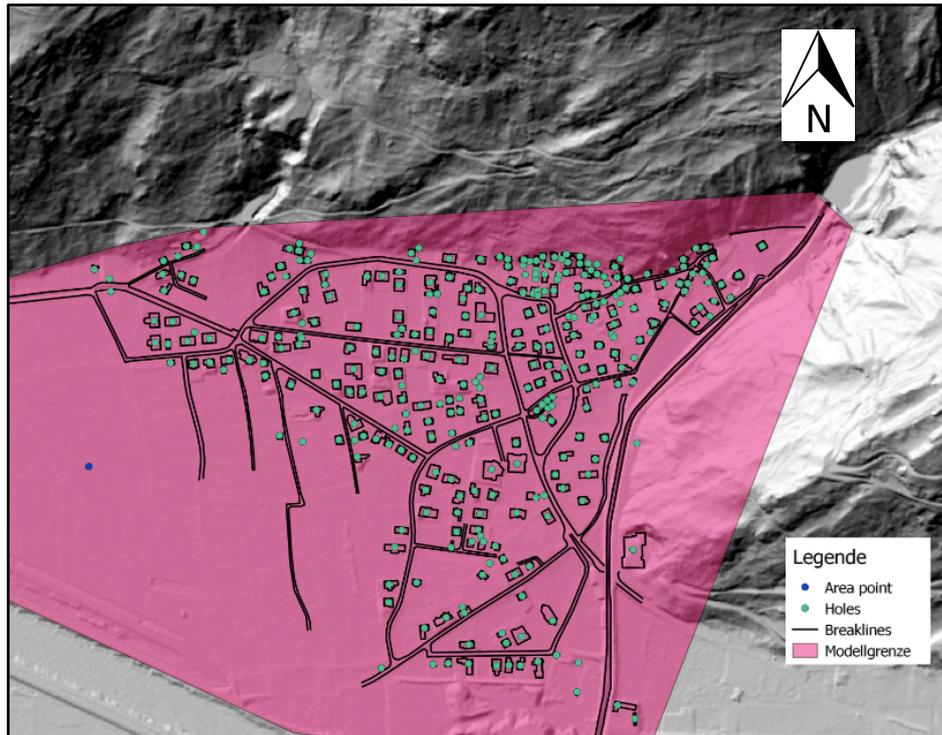


Abbildung 31: Grundlegenden Daten für die Erstellung des Quality Mesh mit Area points, Holes, Bruchkanten und den Modellgrenzen.

Mit Hilfe der Layer der oben dargestellten Modellgrenze, der Bruchkanten, des *Holes*- und *Area point* – Layers ist dann in einem nächsten Schritt mit Hilfe der BASEmesh-Erweiterung das sogenannte *Quality Mesh* erstellt worden. Insgesamt besteht das in Abbildung 32 dargestellte *Quality Mesh*, welches für die Simulation verwendet wurde, aus 17563 dreieckigen Gitternetzelementen. Diese Anzahl wurde durch eine schrittweise Optimierung erreicht, indem unter anderem auch unnötige Stützpunkte aus dem vereinfachten Bruchkantenlayer des Katasterplans herausgelöscht wurden. Dadurch konnte die Anzahl Gitternetzelemente und damit die spätere Rechenzeit bei der Simulation reduziert werden. Wie ersichtlich ist, wurden alle Gebäude, die einen Holes Punkt in Abbildung 31 aufweisen, nicht ins Gitternetz integriert. Es werden bei der späteren Simulation also keine Intensitätswerte für Bereiche im Gebäudeinneren berechnet.

Da das *Quality Mesh* noch keine Höheninformationen beinhaltet, ist anschliessend eine Interpolation mit dem digitalen Höhenmodell swissALTI^{3D} durchgeführt worden, bei dem in BASEmesh die Höheninformationen des Höhenmodellrasters auf die Meshpunkte des *Quality mesh* übertragen wurden (siehe Abbildung 32).

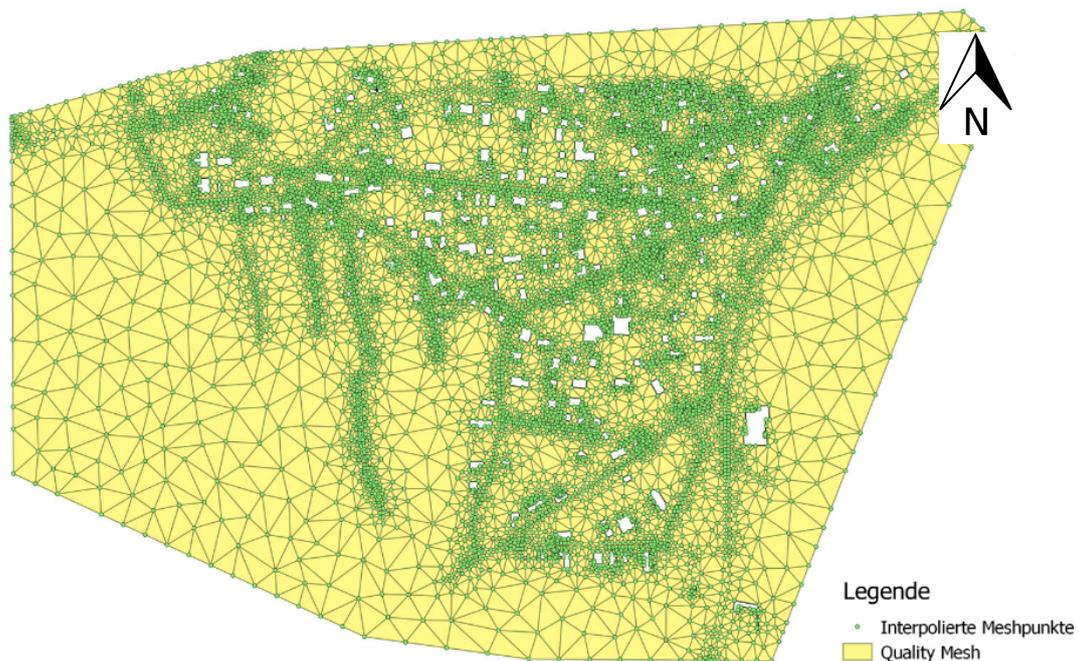


Abbildung 32: Quality Mesh mit interpolierten Meshpunkten zur Höheninformation.

Die Gitternetzelemente des *Quality Mesh* und die interpolierten Meshpunkte mit den Höheninformationen sind schlussendlich in einem letzten Schritt zu einem 2dm-File konvertiert worden. Dieses 2dm-File bildet schliesslich, wie in Abbildung 33 gezeigt, die Topographie für die Simulation in BASEMENT ab.

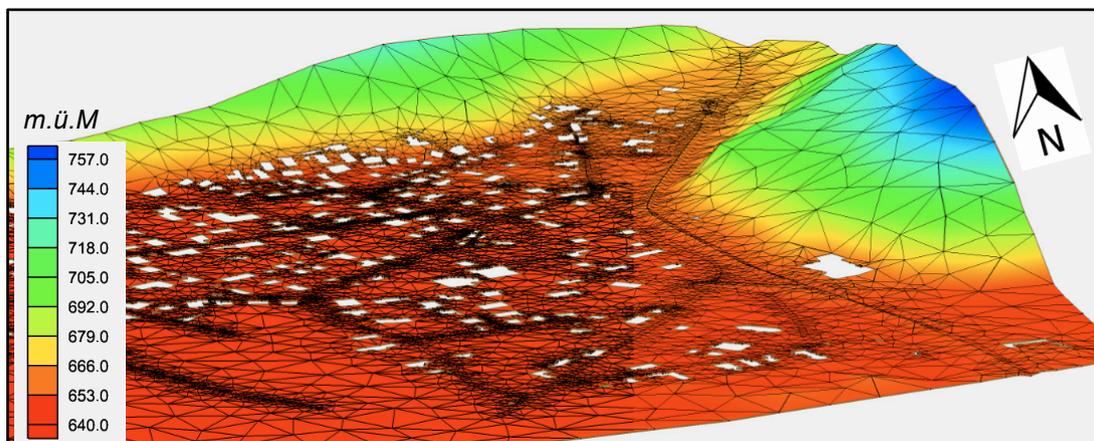


Abbildung 33: 2dm-File als topographische Grundlage der Simulation.

5.1.3 BASEMENT Randbedingungen

Neben dem 2dm-File benötigt man zur Simulation mit BASEMENT noch eine Abflussgang- und eine Sedimentganglinie des Baltschiederbachs für das Ereignis vom 15. Oktober 2000. Die Sedimentganglinie umfasst dabei sowohl Geschiebe als auch Feinsedimentanteile. Da es im Einzugsgebiet des Baltschiederbachs für das Jahr 2000 keine Abflussmessstation gibt, verwendeten Nigg et al. (2002) den an diesem Tag in Visp gemessenen Niederschlag zur Rekonstruktion der folgenden Ganglinie, welche für die Simulation in BASEMENT gebraucht wurde. Vom Niederschlag einer Messstation in

Visp konnte dabei mit Hilfe des modifizierten Clark Modells (beschrieben in Vogt et al., 2002 und Vogt, 2001) auf die Abflussganglinie geschlossen werden (Badoux und Rickenmann, 2008). Der Abfluss ist darin mit einer halbstündlichen Auflösung dargestellt:

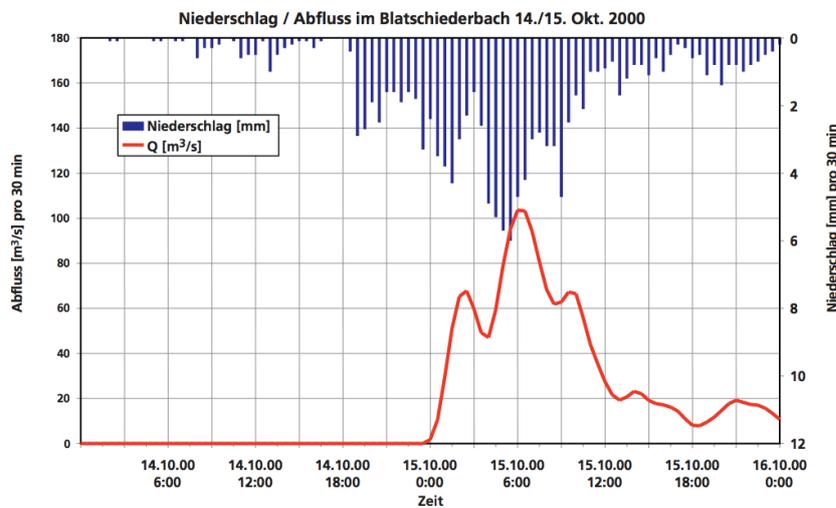


Abbildung 34: In Visp aufgezeichneter Niederschlag (blau) und die modellierte Abflussganglinie des Blatschiederbaches (rot) vom 14.10 – 16.10.2014 (Nigg et al., 2002) .

Die in Abbildung 35 dargestellte Sedimentganglinie ist basierend auf den oben angegebenen Abflusswerten mit folgender Formel für jeden Zeitschritt nach Badoux und Rickenmann (2008) berechnet worden:

$$Q_b = A(Q - Q_{cmin})S^{1.5} \quad (15)$$

mit

Q_b	Geschiebegang	$[m^3/s]$
A	Empirischer Koeffizient	[]
Q	Abfluss	$[m^3/s]$
Q_{cmin}	Unterer Grenzabfluss bei Beginn des Geschiebetransportes	$[m^3/s]$
S	Gerinnegefälle	[]

Für die Berechnung der Sedimentganglinie sind jeweils die von Nigg et al. (2002) hergeleiteten Abflussdaten für Q verwendet worden. Der dimensionslose, empirische Koeffizient A ist dabei so lange variiert worden, bis die aufsummierte Gesamtkubatur des Sedimentganges über die Zeit der gewünschten Grösse entsprach. Die Gesamtkubatur des abgelagerten Geschiebes und Feinsedimentes ist wie in Kapitel 4.4 beschrieben und in Tabelle 9 aufgeführt aus der Literatur entnommen, und während der Kalibrierungsphase schliesslich auf $130'000 m^3$ angepasst worden. Um den Sedimentgang nicht zu überschätzen wurde für den Grenzabfluss bei Beginn des Geschiebetransportes ein unterer Grenzwert Q_{cmin} , welcher nach Bathurst et al. (1987) berechnet werden kann, gewählt. Laut Badoux und Rickenmann (2008) beträgt der untere Grenzwert des Grenzabflusses Q_{cmin} bei Beginn des Geschiebetransportes für das Ereignis in Blatschieder $1.43 m^3/s$. Dieser Wert wurde für die oben beschriebene Formel zur Berechnung der Sedimentganglinie verwendet. Der Parameter S in der Formel bezeichnet das Gerinnegefälle und wurde mit $0.150 []$ ($15 [%]$) für das mittlere Gefälle des Gerinnes im Kegelhalsbereich laut Badoux und Rickenmann (2008) angenommen.

Zusammenfassend wurden für jeden der halbstündigen Zeitschritte die in Tabelle 8 aufgezeigten Inputparameter zur Berechnung des Sedimentganges verwendet.

Tabelle 8: Verwendete Parameter zur Berechnung der für die Simulation verwendeten Sedimentganglinie. Q_{cmin} und S wurden von Badoux und Rickenmann (2008) übernommen.

A []	Q_{cmin} [m^3/s]	S [%]
0.686	1.43	15

Der mit den oben stehenden Inputparametern und Formel 15 berechnete Sedimentgang kann graphisch zusammen mit dem Abfluss des Ereignisses wie folgt dargestellt werden:

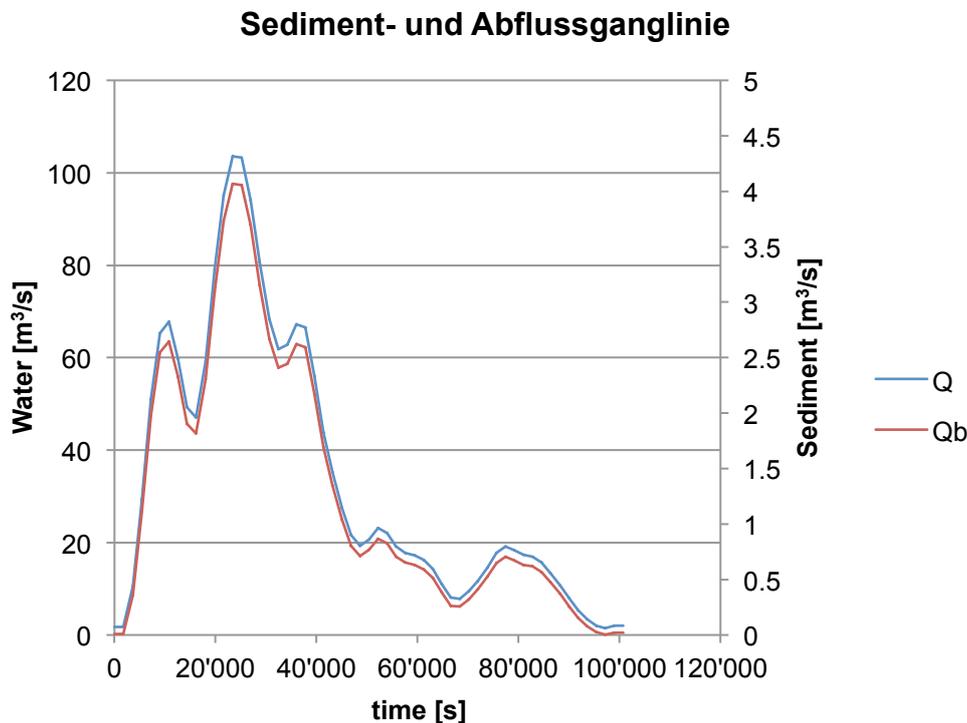


Abbildung 35: Abflussganglinie (Q) in blau und Sedimentganglinie (Q_b) in rot.

Die in der Literatur angegebenen Ablagerungskubaturen in Baltschieder basieren dabei zum Teil auf ex-post Rekonstruktionen, da bereits unmittelbar nach dem Ereignis mit der Räumung begonnen wurde. Dabei ergab sich in manchen Fällen ein fließender Übergang zwischen Geschiebe- und Feinsedimentablagerungen (Jäggi et al., 2004). Diese Umstände tragen zu den bereits besprochenen Unsicherheiten bezüglich der exakt abgelagerten Sedimentkubatur bei. In Tabelle 9 sind die in Kapitel 4.2 behandelten Angaben zur Sedimentkubatur unterschiedlicher Autoren aufgeführt:

Tabelle 9: Angaben zur abgelagerten Sedimentkubatur aus der Literatur.

Autor	Geschiebe [m ³]	Feinanteile [m ³]	Gesamt [m ³]
Biaggi und Zumstein (2001)	70'000 – 90'000	80'000	150'000 – 170'000
Nigg et al. (2002)	70'000	-	-
Jäggi et al. (2004) Eigene Schätzung	75'000 – 95'000	-	-
Jäggi et al. (2004) Rapporte	120'000	-	-

Für die Simulation mit BASEMENT sind deshalb verschiedene Simulationen mit Gesamtgeschiebekubaturen zwischen 50'000 m³ und 120'000 m³ verwendet worden. Da es beim Ereignis eine ausgeprägte Sortierung von grobkörnigen Geschiebeanteilen im Bereich des Kegelhalses und feineren Sedimentklassen gab, wurde bei der Simulation zwischen Feinsediment und Geschiebe unterschieden und eine sogenannte Zweikornsimulation mit der Transportformel mpm-multi durchgeführt. Diese Simulationsart berücksichtigt den Umstand, dass es zu einer gewissen Entmischung der Sedimentpartikel kommt und Feinanteile weiter transportiert werden als grobes Geschiebe. Feinanteile werden dementsprechend weiter weg vom Kegelhals sedimentiert. Dies führt sowohl zu einer genaueren Abbildung der räumlichen Verteilung der Ablagerungshöhen als auch genaueren Ablagerungshöhen per se. Bei der endgültigen Simulation nach Kalibrierung ist von einem Anteil von 50 % größerem Geschiebe und 50 % Feinanteilen ausgegangen worden.

5.1.4 BASEMENT Simulation

Nachdem mit dem 2dm-File und der Abfluss-, sowie der Sedimentganglinie alle Inputdaten für die Simulation mit BASEMENT bereitgestellt waren, ist die Simulation mit Hilfe einer in Abbildung 36 dargestellten graphischen Benutzeroberfläche durchgeführt worden. Über die graphische Benutzeroberfläche von BASEMENT werden grundlegende physische Eigenschaften wie die Viskosität des Fluids, die Berechnungszeitschritte der Simulation, Reibungskoeffizienten, Angaben über die Korngrößen der Sedimentzusammensetzung sowie den Standort des Wasser Zu- und Abflusses innerhalb des 2dm-File angegeben. Zusätzlich kann der Zugabeort des Sediments und weitere Parameter wie die in der Simulation verwendete Geschiebetransportgleichung und die Transportkapazität definiert werden. Auch die auszugebenden Parameter wie Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten werden über die graphische Benutzeroberfläche bestimmt.

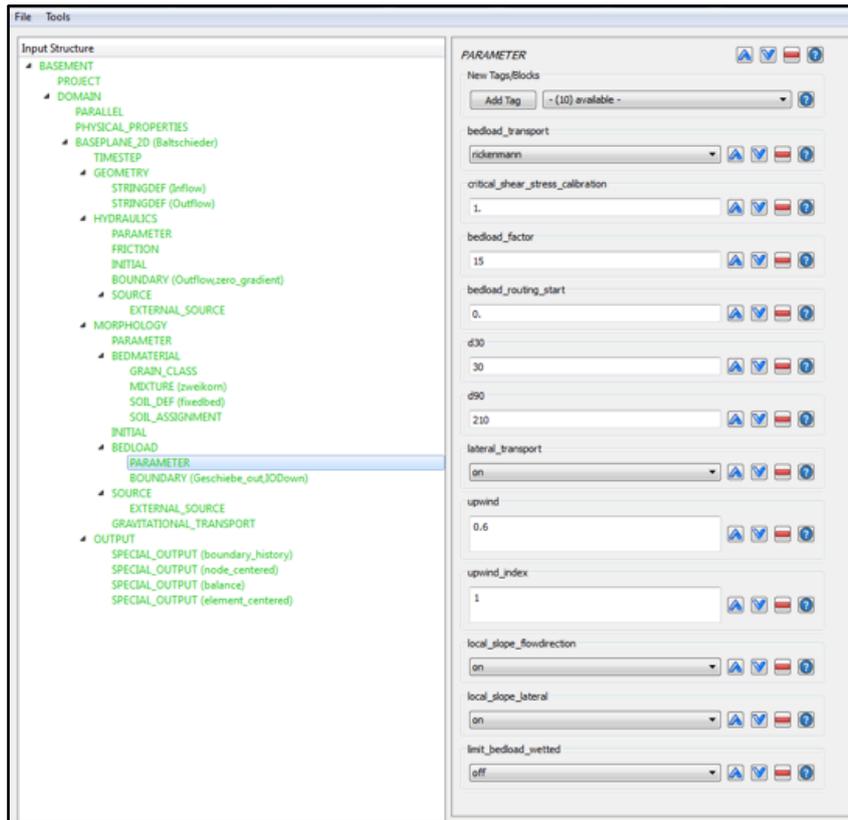


Abbildung 36: Graphische Benutzeroberfläche von BASEMENT mit Beispieldaten für den Geschiebe-transport.

In Abbildung 37 sind die für die Simulation verwendeten Gitternetzelemente als Zugabeort des Sedimentes und des Wassers dargestellt. Die Zugabeorte sind mit Hilfe der Element-ID's der Gitternetzelemente in der graphischen Benutzeroberfläche von BASEMENT angegeben worden. Für den Zugabeort des Sedimentes wurden dabei bewusst vier Gitternetzdreiecke am Fuss der Dammkrone des bereits im Jahr 2000 bestehenden Geschieberückhaltedammes gewählt. Das Sediment ist in Realität entlang des gesamten Gerinnes aus der Sohle, Gerinnedepots im Gerinne selber, durch Seitenerosion und Sedimentzufluss der Zubringerbäche allmählich über das gesamte Ereignis mobilisiert worden (Jäggi et al., 2004). Da aufgrund der Modellgrenzen der Bereich der Simulation jedoch erst ab dem Kegelhals abwärts beginnt, müsste das hineinströmende Wasser direkt die gesamte schlussendlich abgelagerte Sedimentkubatur aufnehmen und transportieren. Dies wäre direkt an der Modellgrenze aufgrund der dort noch geringen Transportkapazität nicht möglich und würde das Simulieren einer möglichst der Realität entsprechenden Sedimentablagerung verhindern. Das Sediment würde gar nicht transportiert oder zu einem grossen Teil liegen gelassen werden. Damit das Wasser gewissermassen von der Modellgrenze weg den Damm hinunter die Fließgeschwindigkeit und damit die Schleppspannung und Transportkapazität steigern kann, wurde das Geschiebe erst weiter unten hinzugegeben.

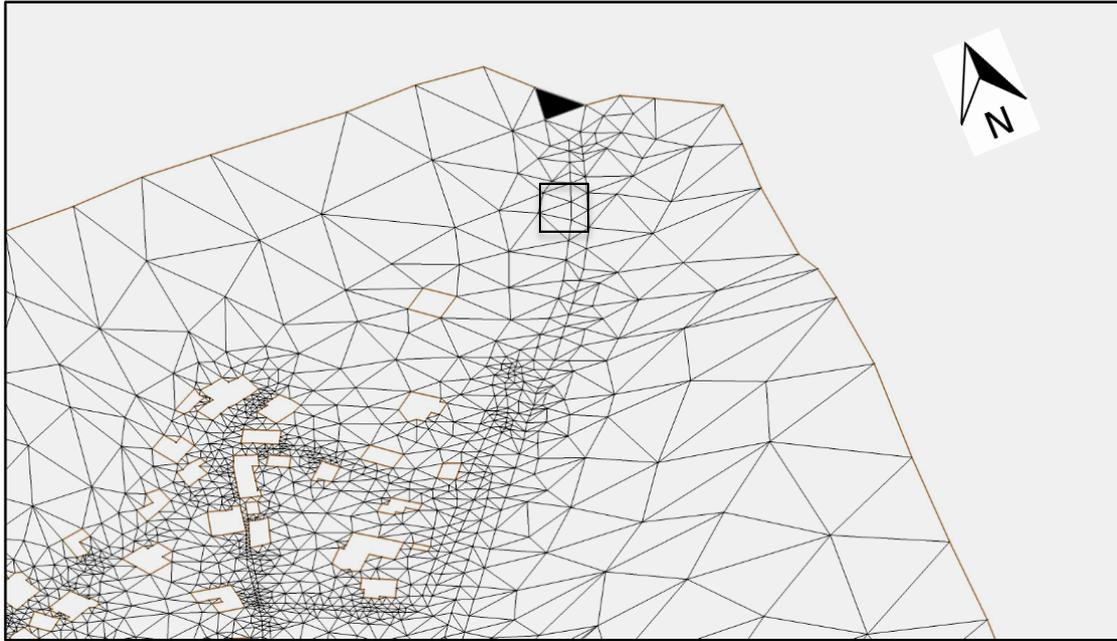


Abbildung 37: 2dm-File mit dem schwarz markierten Zuflussort des Wassers den vier als Zugabeort des Sedimentes verwendeten Gitternetzdreiecken im Bereich des schwarzen Rechtecks.

5.1.5 Bestimmung der Intensitätswerte Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit.

Die Werte für die Ablagerungshöhen (*nds_deltaz*), Fliesstiefen (*nds_depth*) und Fließgeschwindigkeiten (*nds_velocity*) werden über das gesamte Ereignis von BASEMENT aufgezeichnet und können in der Software SMS an zuvor definierten Monitoringpunkten nach Wahl als Textdatei ausgegeben werden. Für die vorliegende Arbeit wurde der Monitoringpunkt, wie an einem Beispiel in Abbildung 38 dargestellt, für jedes Gebäude jeweils im Gitternetzdreieck direkt in der Mitte der dominant angeströmten Wand gesetzt. Die angeströmte Gebäudeseite ist gegenüber der physikalischen Einwirkungen der Überschwemmung am exponiertesten. Aufgrund dieses Umstandes kann beispielsweise die Zerstörung von Fensterscheiben an der angeströmten Gebäudeseite deshalb als am wahrscheinlichsten angenommen werden. Die dominant angeströmte Wand eines Gebäudes wurde dabei jeweils durch die primäre Anströmrichtung während des Ereignisses in SMS identifiziert.

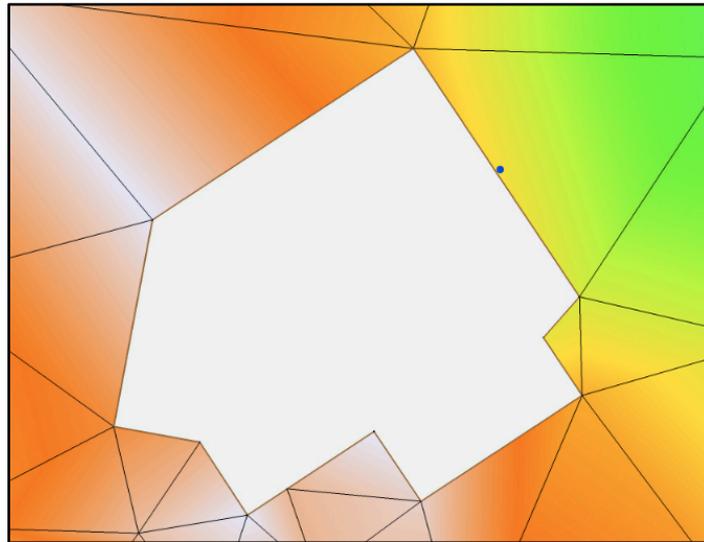


Abbildung 38: Am blau dargestellten Monitoringpunkt an der dominant angeströmten Gebäudeseite wurden am Beispiel dieses Gebäudes für jeden Zeitschritt Werte für Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit als Textdatei ausgegeben.

Die dynamische Beanspruchung der Gebäudeseite an welcher Geschiebe und Feststoffe nur lateral vorbeitransportiert werden, sind im Vergleich zur direkt angeströmten Wand geringer.

5.2 Kalibrierungsprozess

Als weiterer Schritt innerhalb der Prozessrekonstruktion erfolgte jeweils eine Kalibrierung der Simulationsergebnisse anhand der Ablagerungshöhen. Bei der Kalibrierung wurden zunächst Kalibrierungsdaten in Form von Bildmaterial und einer groben Ablagerungskarte der Gemeinde zusammengetragen, um ein möglichst genaues Bild der räumlichen Verteilung der Ablagerungshöhen nach dem Ereignis als Kalibrierungsgrundlage zu haben. Die Simulationseinstellungen in BASEMENT sind dann so lange angepasst worden, bis die resultierenden Ablagerungshöhen möglichst konsistent zur anhand der Kalibrierungsdaten rekonstruierten Realität waren. In Abbildung 39 wird eine schematische Übersicht über den Kalibrierungsprozess gegeben. Die jeweiligen methodischen Einzelschritte sind mit Kapitelangaben markiert.

PROZESSREKONSTRUKTION

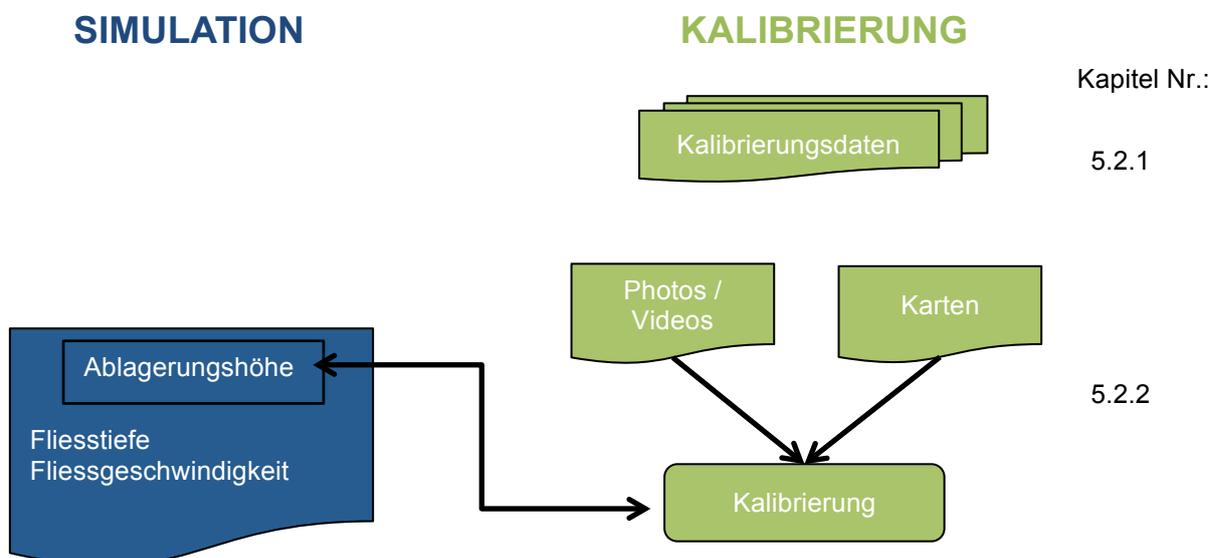


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Kalibrierung der Simulationsergebnisse anhand der Ablagerungshöhen.

5.2.1 Kalibrierungsgrundlagen

Für die Kalibrierung und Validierung der Simulationsergebnisse ist das Intensitätskriterium der Ablagerungshöhe nach dem Ereignis verwendet worden, da für dieses Kriterium ex-post nach dem Ereignis die umfangreichste Validierungsgrundlage bestand. Im Wesentlichen sind 3 Quellen als Grundlage verwendet worden:

1. Koordinaten der Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von > 0.00 im Portfolio der Mobiliar in Baltschieder
2. Nach dem Ereignis aufgenommene Photos
3. Eine Übersichtskarte der Gemeinde mit grober Einteilung in Zonen mit gleich mächtiger Ablagerungshöhe (Biaggi und Zumstein, 2001)

Bei Gebäuden mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 aus dem Portfolio der Mobiliar weiss man per se nicht, ob diese Schadenempfindlichkeit eine Folge davon ist, dass trotz physischer Einwirkung kein Schaden entstanden ist (beispielsweise aufgrund einer geringen physischen Vulnerabilität des Gebäudes) oder das Gebäude aufgrund seiner Lage gar nicht von der Überschwemmung betroffen war. Deshalb wurden die Gebäude mit Schadenempfindlichkeit 0.00 nicht für Kalibrierungszwecke verwendet. Umgekehrt kann man aber bei den Wohngebäuden mit einer Schadenempfindlichkeit > 0.00 wahrscheinlich in den meisten Fällen davon ausgehen, dass diese Gebäude von der Überschwemmung betroffen waren und deren physische Einwirkung zum Schaden geführt hat. Diese Gebäude können so also eine Information über die räumliche Ausdehnung der Überschwemmung liefern.

Die nach dem Ereignis aufgenommenen Photos als weitere Mittel zur Kalibrierung wurden von der Gemeinde, dem Archiv einer regionalen Zeitung und einer Privatperson in Baltschieder beschafft. Hauptkriterium für die Verwendbarkeit der Photos war die darauf klar zu erkennende Ablagerungshöhe. Insgesamt konnten 64 Photos von 15 verschiedenen Gebäuden vor Ort lokalisiert werden, in dem die Gebäude bei Rundgängen in Baltschieder und Befragungen der Einwohner identifiziert wurden. Die Ablagerungshöhen wurde anschliessend im Feld anhand der Vermessung von auf dem Photo sichtbaren Referenzobjekten quantifiziert. Die Referenzobjekte bestehen zum heutigen Zeitpunkt immer noch und bildeten so einen Massstab für die Quantifizierung der auf dem Photo sichtbaren Ablagerungshöhen. Das konkrete Vorgehen im Einzelfall wird anhand der Abbildung 40 illustriert. In Abbildung 40 A ist klar zu erkennen, dass beim Ereignis Geschiebe auf eine Höhe bis zur Treppenlaube sedimentiert wurde. Die Treppenlaube besteht, wie in Abbildung 40 B gezeigt, noch heute und konnte als Massstab verwendet werden. Durch eine Messung der Höhe der Treppenlaube vom Boden aus konnte so die Ablagerungshöhe für diesen Fall relativ genau im Nachhinein auf 2.30 m quantifiziert werden. Insgesamt konnte auf diese Weise die Ablagerungshöhen aller 15 lokalisierten Gebäude bestimmt werden. Die Gebäude sind in Abbildung 41 mit einer blauen Fläche markiert.



Abbildung 40: A: Kalibrierungsphoto eines Wohngebäudes (Photograph unbekannt). B: Bis heute bestehende Treppenlaube als Massstab für die Quantifizierung der Ablagerungshöhe.

Schliesslich wurde als weitere Kalibrierungsgrundlage eine Karte des Krisenstabes der Gemeinde Baltschieder verwendet. Die Karte bot eine auf Feldaufnahmen nach dem Ereignis basierende Übersicht über Flächen, welche mit Geschiebe und Feinanteilen bedeckt waren.

Die Lage der Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit > 0.00 , die lokalisierten und quantifizierten Ablagerungshöhen sowie die Informationen zu Geschiebe und Feinanteilen aus der Karte des kommunalen Krisenstabes sind anschliessend im GIS auf einem Layer visualisiert worden. Die resultierende Übersichtskarte ist in Abbildung 41 dargestellt und war die zusammengefasste Kalibrierungsgrundlage der Simulation.

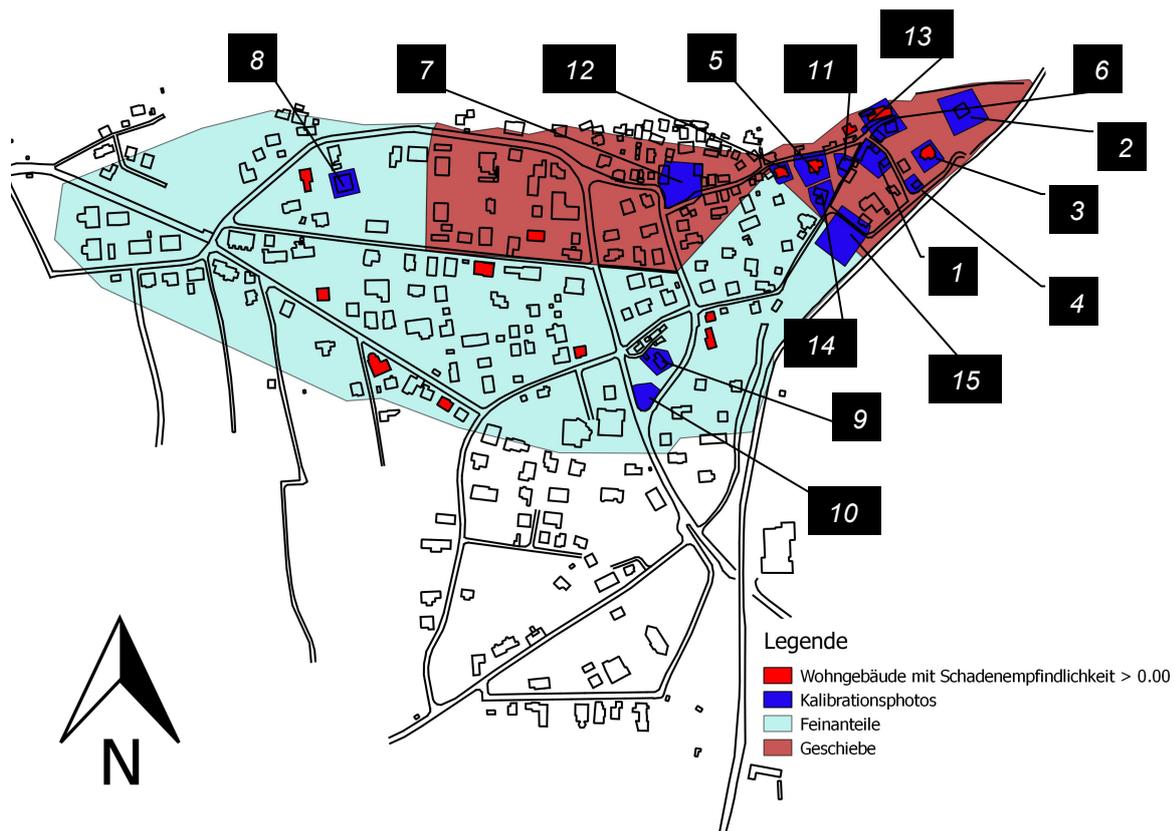


Abbildung 41: Kartendarstellung der zur Kalibrierung verwendeten Grundlagen. Die verwendeten Kalibrationsphotos sind durchnummeriert.

5.2.2 Kalibrierung

Bei der eigentlichen Kalibrierung wurde dann versucht, die finalen Ablagerungshöhen des Simulationsergebnisses möglichst genau mit der oben beschriebenen Kalibrierungskarte in Übereinstimmung zu bringen. Die Größenordnung der Feststoffkubatur, des Anteils Geschiebe und Feinsediment sowie des Korndurchmesser D_{50} sind aus Werten der Literatur entnommen und für eine erste Simulation verwendet worden.

Die angegebenen Parameter aus der Literatur sind dabei nicht als exakte Werte, sondern vielmehr als erste Richtwerte zu sehen, da sie vielfach auf Schätzungen und groben Feldaufnahmen beruhen. Daher wurden die Parameter Feststoffkubatur, Transportfaktor, der Anteil Geschiebe und Feinsediment, der Korndurchmesser D_{50} und die Korndurchmesser der Feinanteile D_{fein} solange angepasst, bis das Simulationsergebnis möglichst konsistent zu den Ablagerungen auf der Kalibrierungskarte war. Insgesamt wurden so 72 Simulationen mit variierenden Einstellungen durchgeführt, um auf das im Kapitel Resultate gezeigte Endresultat zu kommen. Einige Beispiele für Simulationsergebnisse mit variierten Einstellungen der Kalibrierungsparameter sind im Anhang dargestellt, um einen Eindruck über die Sensitivität der einzelnen Parameter zu vermitteln.

Wie in Kapitel 5.1.5 beschrieben, sind schliesslich auf Grundlage der kalibrierten Einstellungen die Intensitätswerte Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit für die weitere Analyse bestimmt worden.

5.3 Herleitung eines schadenbasierten Klassierungssystems

Zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität muss die Intensität eines auf ein Gebäude einwirkenden Prozesses mit der Schadenempfindlichkeit des jeweiligen Gebäudes verknüpft werden. Die Intensität ist dabei über ein bestimmtes physikalisches Kriterium definiert. In der schweizerischen Naturgefahrenpraxis wird bei dynamischen Überschwemmungen das Produkt aus Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe ($v \cdot h$) als Intensitätskriterium verwendet. Da dieses Kriterium aber, wie bereits dargelegt, eher auf die Gefährdung des Menschen abzielt, wurde in der vorliegenden Arbeit zunächst ein neues Intensitätskriterium hergeleitet. Das neue Intensitätskriterium soll dabei eine quantifizierbare Grösse sein, welche die physikalische Einwirkung auf das Gebäude charakterisiert, gleichzeitig für die Schadenentstehung mitverantwortlich ist und somit die Gebäudevulnerabilität mitsteuert.

Bezogen auf die physikalischen und zerstörerischen Einwirkungen einer feststoffführenden Überschwemmung wird dabei in dieser Arbeit auf folgende drei Einwirkungsarten fokussiert:

- Einwirkung durch hydrodynamische Beanspruchung (Staudruck)
- Einwirkung durch hydrostatische Beanspruchung
- Einwirkung durch die kinetische Energie von anprallenden Feststoffen

Mit Blick auf die mathematischen Definitionen der einzelnen Einwirkungen (siehe Kapitel 3.3.1) zeigt sich, dass die Fließgeschwindigkeit (genau genommen das Quadrat davon) bei der hydrodynamischen Beanspruchung, bei der kinetischen Energie durch Anprall von schwimmenden Feststoffen und die Fliesstiefe bei der hydrostatischen Beanspruchung wichtig für die Magnitude der physikalischen Einwirkung des Überschwemmungsprozesses zu sein scheinen.

In den folgenden Unterkapiteln wird nun zunächst das vulnerabelste Gebäudeelement an einem Wohngebäude identifiziert und danach die Widerstandsfähigkeit dieses Elementes gegenüber den drei ausgewählten physischen Einwirkungen einer feststoffführenden Überschwemmung diskutiert. Die in dieser Arbeit verwendeten Intensitätskriterien werden so Schritt für Schritt hergeleitet. Die spätere Zuordnung zu einer Intensitätsklasse erfolgt dabei auf Grundlage der hergeleiteten Intensitätskriterien, welche mit den kalibrierten Simulationsergebnissen generiert werden. Abbildung 42 gibt eine Übersicht über den methodischen Zusammenhang.

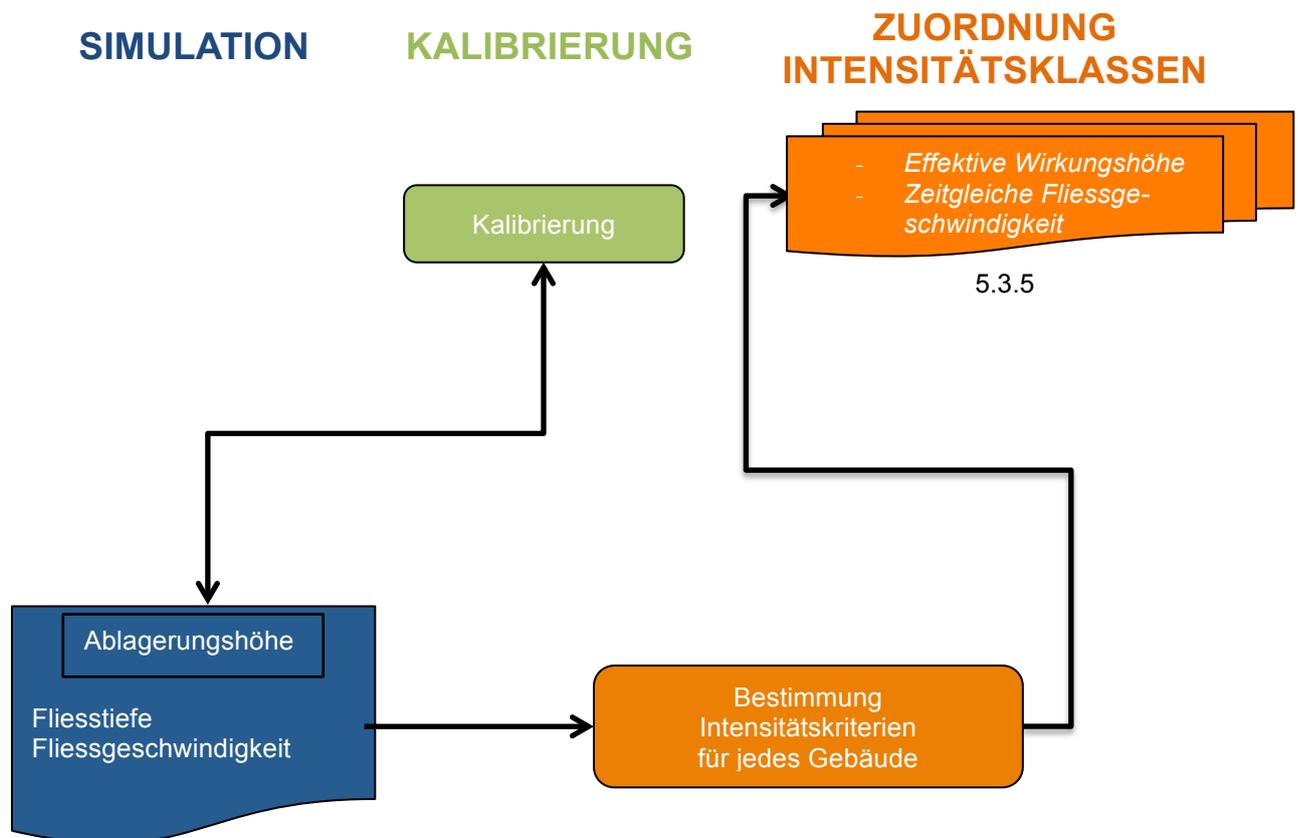


Abbildung 42: Schematische Übersicht mit der Bestimmung der Intensitätskriterien für jedes Gebäude als erster methodischer Schritt für die Zuordnung des Gebäudes zu einer Intensitätsklasse mit Hilfe des neu entwickelten Klassierungssystems.

5.3.1 Rolle der Gebäudeöffnungen im Zusammenhang mit der physischen Vulnerabilität

Für die entstehende Schadenhöhe und damit für die Schadenempfindlichkeit und physische Vulnerabilität eines Gebäudes ist es entscheidend, ob Wasser im Ereignisfall ins Gebäude eindringen kann oder nicht (Holub et al., 2012). Gemäss Egli (2007) kann Vernässung und Schmutzeinlagerung innerhalb des Gebäudes dort nämlich zum vollständigen Werteverlust an Gebäudeausbauten wie Decken, Böden oder Wänden führen. Dabei weist die Vernässung meistens eine höhere Wirkungshöhe auf als der maximale Wasserstand, da es je nach Material mehr oder weniger stark zu Absorptions- und Kapillareffekten kommt. Nichts desto trotz beeinflusst der maximale Wasserstand natürlich die Wirkungshöhe der Vernässung und damit den Schaden. Sobald Wasser und Feststoffe ins Innere des Gebäudes gelangt, kommt es als Folge der oben beschriebenen Vernässung und des Schmutzeintrags zu einem sprunghaften Anstieg des Schadens, was sich auch in der Schadenempfindlichkeit und schliesslich in der physischen Vulnerabilität niederschlägt (Holub et al, 2012).

Da Gebäudeöffnungen mitentscheiden ob Wasser und Feststoffe ins Innere gelangen oder nicht, weisen Fuchs et al. (2007) diesen, wie allgemein anerkannt, eine zentrale Rolle bezüglich der physischen Vulnerabilität eines Gebäudes zu. Zum grossflächigen Eindringen des Wasser-/Feststoffgemisches kommt es dabei, sobald die Gebäudehülle vom Wasser durch grössere Öffnungen überwunden werden kann. Dies zeigt sich auch in den ermittelten Vulnerabilitätswerten von Fuchs et al. (2007); Fuchs

und Heiss (2008); Fuchs (2009); Totschnig et al. (2011) und Paphoma-Köhle (2012a), bei welchen jeweils ab einer Ablagerungshöhe von 1 m bis 1.5 m ein sprunghafter Anstieg oder eine grosse Streuung der korrespondierenden Schadenempfindlichkeit zu beobachten ist. Dieser Anstieg oder die Streuung kann mit dem Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Fenstern in der Gebäudehülle auf einer Höhe von 1 m – 1.5 m über dem Boden erklärt werden (Totschnig und Fuchs, 2012). Fenster als Bauelemente in der Gebäudehülle scheinen also mit zu determinieren, in welchem Mass Wasser und Feststoffe ins Gebäude eindringen können oder nicht.

Weiter sind Fenster und insbesondere Fensterscheiben von ihrer kinetischen Energieaufnahmekapazität und der Druckfestigkeit im Vergleich zum Mauerwerk das wohl vulnerabelste Glied in der Gebäudehülle. So können beispielsweise Mauern als weiteres wichtiges Element der Gebäudehülle eine vergleichsweise hohe kinetische Energie von bis zu 300 kJ aufnehmen (Egli, 2007). Der relativ hohen Vulnerabilität von Fensterglas ist sich auch Suter (1988) bewusst und bezeichnet Fenster als Schwachstelle in der Gebäudehülle.

Der Widerstand von Fenstern und Fensterscheiben gegenüber den oben beschriebenen drei Einwirkungen bestimmt daher, welche Intensitätskriterien und auch -klassen für die Betrachtung der physischen Vulnerabilität entscheidend sind. Aus diesem Grund soll in der Folge die Widerstandsfähigkeit von Fensterscheiben gegenüber den Prozesseinwirkungen einer feststoffführenden Überschwemmung als eine Grundlage für die Bestimmung des Intensitätskriteriums verwendet werden. Es wird dabei jeweils von zweifach Isolierglas aus Floatglas mit einer Einzelscheibendicke von 4 mm ausgegangen. Dies ist nach Angaben des schweizerischen Instituts für Glas am Bau (SIGAB) eine durchschnittliche in Einfamilienhäusern in der Schweiz verbaute Fensterscheibe (Meili, 2014).

5.3.2 Druckfestigkeit von Fensterscheiben gegenüber Strömungsdruck

Wie in Kapitel 3.3.1 dargelegt, erfolgt die Einwirkung des Strömungsdrucks auf die Fensterscheibe durch den Druck aus hydrodynamischer und hydrostatischer Beanspruchung. Im Rahmen dieser Arbeit konnten weder bei diversen Fensterverbänden noch Prüfinstituten empirisch hergeleitete Widerstandswerte von durchschnittlichen Fensterscheiben gegen die Einwirkung des Strömungsdrucks von Überschwemmungen ausfindig gemacht werden. Im Gegensatz zu speziellen Hochwasserschutzscheiben fehlen diesbezüglich im Moment noch die auf empirischen Versuchen basierenden Grundlagen. Bei einem europäischen Fensterhersteller konnte ein berechneter Richtwert bezüglich der Druckfestigkeit gegenüber Strömungsdruck von rund 10 kN/m^2 eingeholt werden (Meyer, 2014). Dieser Richtwert wird nachfolgend verwendet.

5.3.2.1 Die Einwirkung der hydrodynamischen Beanspruchung auf Fensterscheiben

Der Druck aus hydrodynamischer Beanspruchung berechnet sich, wie bereits behandelt, gemäss Formel 11. Zur Berechnung der Fliessgeschwindigkeit die minimal notwendig ist, um die Belastungsgrenze von 10 kN/m^2 zu erreichen, wurden drei Fälle mit unterschiedlichen Fluidichten differenziert: 1 t/m^3 , 1.4 t/m^3 und 1.7 t/m^3 . Beim ersten Fall mit einer Dichte von 1 t/m^3 wird von reinem Wasser ausgegangen. Auch bei dynamischen Überschwemmungen mit langsamen Fliessgeschwindigkeiten ($< 2 \text{ m/s}$) wird die Dichte etwas höher als 1 t/m^3 liegen, da Feinsedimente bereits in Suspension transportiert werden können. Zudem ist als weitere Annahme eine gemäss Egli (2007) typische Dichte des Wasser-Feststoffgemisches von feststoffführenden Überschwemmungen von 1.4 t/m^3 verwendet worden. Schliesslich ist in einem weiteren Fall noch von einer Dichte des Fluids von 1.7 t/m^3 (ONR-24800, 2009) als Extremannahme im Übergang zum Murgang ausgegangen worden. Bei einem Richtwert c_d von 1.5 gemäss Egli (2007) kommt man mit Formel 11 auf folgende Grenzflussge-

schwindigkeiten, welche unabhängig von der statischen Beanspruchung ausreichen, um an die dynamische Belastungsgrenze von 10 kN/m^2 zu gelangen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Grenzflussgeschwindigkeiten für unterschiedliche Dichten des Wasser- Feststoffgemisches, welche bei einer Widerstandsfähigkeit von 10 kN/m^2 zum Bruch einer Fensterscheibe durch rein hydrodynamische Beanspruchung führen.

Dichte Wasser- Feststoffgemisch [t/m ³]	Grenzflussgeschwindigkeit [m/s]
1	3.65
1.4	3.09
1.7	2.80

5.3.2.2 Die Einwirkung der hydrostatischen Beanspruchung auf Fensterscheiben

In Bezug auf die hydrostatische Beanspruchung können gemäss Formel 12 mit den angenommenen Fluidichten von 1 t/m^3 , 1.4 t/m^3 und 1.7 t/m^3 folgende minimale Grenzwassertiefen, welche zum Bruch führen können, hergeleitet werden (siehe Tabelle 11). Es wird dabei von komplett statischen Bedingungen (ohne hydrodynamische Beanspruchung) ausgegangen.

Tabelle 11: Grenzwassertiefen für unterschiedliche Dichten des Wasser- Feststoffgemisches, welche bei einer Widerstandsfähigkeit von 10 kN/m^2 zum Bruch einer Fensterscheibe durch rein statische Beanspruchung führen.

Dichte Wasser- Feststoffgemisch [t/m ³]	Wasserstand ab Unterkante Fenster [m]
1	1.02
1.4	0.73
1.7	0.60

Werden diese Wassertiefen oberhalb der Fensterunterkante erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass die Fensterscheibe durch eine hydrostatische Beanspruchung von 10 kN/m^2 an ihre Belastungsgrenze geführt wird.

Bei einem Fenster, welches sich beispielsweise 1 m über dem Boden befindet, ist also bei einer Fluidichte von 1 t/m^3 ein reiner Wasserstand von 2.02 m nötig, um die Fensterscheibe alleine durch den hydrostatischen Druck zu Bruch zu bringen. Für den Fall einer Aufschotterung bis zur Fensterunterkante reicht hingegen bereits ein Wasserstand von 1.02 m für die Zerstörung der Scheibe aus.

Sobald das Fenster aber von der dynamischen Überschwemmung erfasst wird, wirkt neben der hydrostatischen auch noch die hydrodynamische Beanspruchung. In Summe ergeben die beiden Beanspruchungen den Strömungsdruck welcher ab 10 kN/m^2 zum Bruch der Fensterscheibe führt. Es ist deshalb möglich, dass Fensterscheiben bei entsprechender hydrodynamischer oder hydrostatischer Beanspruchung bereits bei weit geringeren Fliesstiefen respektive -geschwindigkeiten brechen. So würde beispielsweise vermutlich eine Fließgeschwindigkeit von bereits 1 m/s bei einer Fliesstiefe von 0.60 m ab Unterkante Fenster ausreichen, um dieses bei einer Wasser-Feststoffdichte von 1.7 t/m^3 zu Bruch zu bringen.

5.3.3 Die kinetische Energieaufnahmekapazität von Fensterscheiben gegenüber anprallenden Feststoffen

Für die Aufnahmekapazität von kinetischer Energie durch Anprall von Feststoffen im Wasser ist zur Zeit ebenfalls noch keine empirische Datengrundlage vorhanden. Es gibt Prüfverfahren zur sogenannten Einbruchhemmung und Stossbelastungen. Bei diesen Prüfverfahren wirkt wahlweise ein starre (harter Stoss) oder verformbare (weicher Stoss) Masse aus unterschiedlichen Fallhöhen gemäss DIN EN 356 (1999) auf das Fensterglas ein. Die Ergebnisse dieser Prüfverfahren lassen sich jedoch physisch nicht mit der Einwirkung von anprallenden Feststoffen während einer dynamischen, feststoffführenden Überschwemmung vergleichen. Einerseits wird bei der Prüfung der Auftrieb des Wassers nicht berücksichtigt. Andererseits ist die Fallgeschwindigkeit der Prüfmasse von 9.81 m/s deutlich höher als die maximale Fließgeschwindigkeit von fluvialem Feststofftransport (Rudolf-Miklau und Suda, 2012) und damit auch der Anprallgeschwindigkeit von Feststoffen. Ausserdem werden die Stossprüfungen ausschliesslich für Verbund-Sicherheitsglas (VSG) durchgeführt. Entsprechende Werte für durchschnittliche Einfamilienhausscheiben aus Zweischeibenisolier-Floatglas fehlen (Helle, 2014).

Als Grundlage für eine grobe Abschätzung der Grössenordnung der Aufnahmekapazität kinetischer Energie von Fensterscheiben musste bedingt durch den Mangel an anderen Daten das Hagelregister der Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen (VKF) herangezogen werden. Im Hagelregister sind Bauelemente unterschiedlicher Hersteller auf die kinetische Energie von anprallenden Hagelkörnern hin geprüft und einer Widerstandsklasse zugeordnet worden. Für doppelverglaste Floatglasscheiben mit einer Dicke von 4 mm ergibt sich hier ein Hagelwiderstand von 5. Dies entspricht der Energieaufnahmekapazität von bis zu 27 Joule (Egli, 2007). Im Fall von feststoffführenden Überschwemmungen muss tendenziell wohl von einer geringeren Energieaufnahmekapazität ausgegangen werden, da anprallende Feststoffe (Steine, Kies, Schwemmholz) beim Anprall an das Fenster im Gegensatz zu Hagelkörnern nicht zerspringen.

Auch wenn die beiden Prozesse Hagelschlag und Anprall von Feststoffen bei dynamischen Überschwemmungen physikalisch nur bedingt vergleichbar sind, lässt sich doch mangels anderer Daten grob die Magnitude der Aufnahmekapazität von Fenstern gegenüber kinetischer Energie durch Anprall abschätzen. Basierend auf den Werten im Hagelregister (VKF, 2014) bricht ein doppelverglastes Fenster demnach bereits bei der kinetischen Einwirkung in der Grössenordnung von wenigen Zehnern Joule.

5.3.3.1 Die Einwirkung des Feststoffanpralls bei feststoffführenden Überschwemmungen

Grundsätzlich muss aufgrund der in Kapitel 2.3.3.2 diskutierten Transportarten von Feststoffen beim schadenverursachenden Feststoffanprall an das Gebäude zwischen dem Anprall von Geschiebe und dem Anprall von Schwemmholz differenziert werden. Beim Geschiebetransport ist die Anprallgeschwindigkeit kleiner als die Fließgeschwindigkeit des Wassers, beim Schwemmholztransport ist die

Geschwindigkeit des Anpralls hingegen der Fließgeschwindigkeit gleichzusetzen. Ausserdem werden schwimmende Feststoffe an der Wasseroberfläche transportiert, während Geschiebe vorwiegend in Sohlennähe bewegt wird. Grundsätzlich muss mit bei einer dynamischen Überschwemmung eines Wildbachs oder Gebirgsflusses mit beiden Transportarten gerechnet werden, wie Abbildung 43 am Beispiel von Baltschieder verdeutlicht.



Abbildung 43: Während des Überschwemmungsereignisses in Baltschieder 2000 transportiertes und schliesslich abgelagertes Schwemmholz und Geschiebe, während der Aufräumarbeiten (Photograph unbekannt).

Bei einem Ereignis bei dem Schwemmholz und Geschiebe beteiligt sind, wird das Schwemmholz also im direkten Vergleich mit einer höheren Anprallgeschwindigkeit und an der Wasseroberfläche auf das Gebäude treffen. Aus diesem Grund kann der Schwemmholztransport für die schadensbringende Einwirkung auf ein Fenster als ungünstigere der beiden Transportarten bezeichnet werden. Aufgrund der höheren Anprallgeschwindigkeit wirken potentiell höhere kinetische Energien und das Fenster wird durch das Schwemmholz im Gegensatz zum Geschiebe, wie in Abbildung 44, dargestellt, bereits bei geringeren Fliesstiefen erreicht. Ausserdem muss bei Überschwemmungen grundsätzlich immer mit Schwemmholz in Gebirgsfluss- und Wildbacheinzugsgebieten gerechnet werden (Lange und Bezzola, 2006). Aus diesen Gründen wird hier in Bezug auf die Einwirkung durch kinetische Anprallenergie und zur Definition der Klassengrenzen und der Intensitätskriterien auf den Schwemmholztransport als massgebende Art des Feststofftransportes eingegangen.

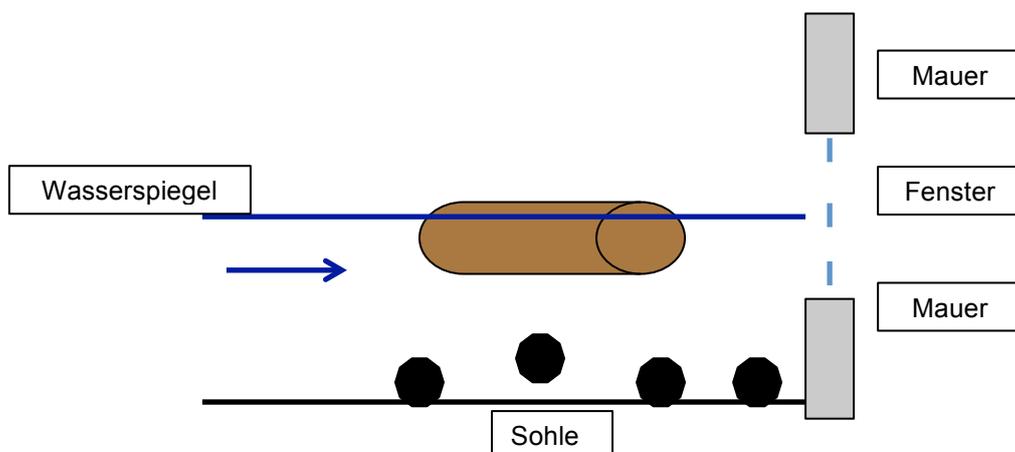


Abbildung 44: Im Vergleich zum Geschiebe, welches gleitend, rollend und springend entlang der Sohle transportiert wird, wird Schwemmholz an der Wasseroberfläche schwimmt.

Nachfolgend sind beispielhaft einwirkende kinetische Anprallenergien von Baumstämmen mit unterschiedlichen Dimensionen dargestellt. Schwemmholz kommt grundsätzlich in allen Abmessungen und Dimensionen vor. Dies liegt einerseits in der alters- oder standortbedingten Wuchshöhe der Bäume begründet, andererseits aber auch im Zerkleinerungsprozess, welcher während des Schwemmholztransportes zum Zerbrechen in kleinere Teile führt (Hübl et al., 2011). Für die nachfolgende Berechnungen wurde die europäische Lärche (*Larix decidua*) als Holzart mit einer trockenen Dichte von 550 kg/m^3 (ÖNORM M 7132, 1986) gewählt, da diese Baumart in alpinen Einzugsgebieten von Gebirgsflüssen- und Wildbächen vor allem in höheren Lagen weit verbreitet ist (Veit, 2013). Als geometrischer Körper für die Volumenberechnung ist ein Zylinder als Approximation für einen Baumstamm angenommen worden. Die Fliessgeschwindigkeit wurde auf 1 m/s als minimale Fliessgeschwindigkeit von dynamischen Überschwemmungen nach Rudolf-Miklau und Suda (2012) festgesetzt.

Die europäische Lärche erreicht Wuchshöhen von bis zu 50 m und Stammdurchmesser von maximal 1.5 m (Willuweit et al., 2003). Diese Abmessungen stellen gleichsam die maximal möglichen Dimensionen von Grün- oder Totholz dar, welche beim Schwemmholztransport theoretisch möglich wären. Ausserdem ist für die nachfolgenden Berechnungen der kinetischen Anprallenergie auch von den genormten Dimensionen von Industrieholz ausgegangen worden, denn Industrieholz stellt neben Grün- und Totholz einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am gesamten Schwemmholz dar (Waldner et al., 2005). Industrieholz wird in der Schweiz meistens von den Forstbetrieben in Form von Baumstämmen als Depots für den anschliessenden Weitertransport auf Strasse und Schiene gelagert. Speziell für den Bahntransport ist die maximale Länge der Baumstämmen dabei meistens auf 6 m beschränkt. Die minimale Länge von kurzem Industrieholz ist auf 1 m festgelegt.

Die Stammdurchmesser variieren dabei je nach Sortimentsklasse und Abnehmer des Industrieholzes (Riegger, 2006). Mittelt man die vorgeschriebenen Durchmesserangaben der Schweizerischen Interessensgemeinschaft Industrieholz (2006) über alle Sortimentsklassen, so kommt man auf einen Wert von rund 0.3 m Durchmesser. Dieser Durchmesserwert wurde, wie in Tabelle 12 aufgeführt, zur Berechnung der kinetischen Anprallenergie von Industrieholz (6 m , 1 m) gemäss Formel 13 verwendet.

Tabelle 12: Berechnete kinetische Energien für Baumstämmen mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern.

Länge [m]	Durchmesser [m]	Volumen [m ³]	Masse [kg]	Fliessgeschwindigkeit [m/s]	Kin. Energie [Joule]
50	1.5	88.357	48596.35	1 m/s	24298.18
6	0.3	0.424	233.20	1 m/s	116.60
1	0.3	0.071	39.05	1 m/s	19.53

Die oben stehenden Beispiele zeigen, dass bereits ein zugesägter Stamm mit nur 1 m Länge und 30 cm Durchmesser beim Anprall auf ein Fenster mit einer für dynamische Überschwemmungen minimalen Fliessgeschwindigkeit von 1 m/s zu fast 20 Joule kinetischer Energie führt. Im Vergleich zur kinetischen Energieaufnahmekapazität einer Fensterscheibe von einigen Zehnern Joule würde dies damit bereits zur Zerstörung des Fensters führen.

5.3.4 Synthese Intensitätskriterium

Fensterscheiben reagieren sehr vulnerabel gegenüber der Einwirkung von kinetischer Energie anprallender Feststoffe. Bereits bei einer für dynamische Überschwemmungen minimalen Fließgeschwindigkeit von 1 m/s ist mit der Zerstörung von Fenstern durch Schwemmholzanprall zu rechnen. Gleichzeitig sind die in Tabelle 11 berechneten Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten in Realität wohl bedeutend geringer, da hydrostatische und hydrodynamische Beanspruchung als Summe den Strömungsdruck generieren, der für den Bruch verantwortlich ist. Ausserdem kommt im Falle einer Aufschotterung über die Fensterunterkante noch zusätzlich der Druck des abgelagerten Materials als weitere Einwirkung hinzu. Aus diesen Gründen ist deshalb davon auszugehen, dass Fensterscheiben durch dynamische, feststoffführende Überschwemmungen zerstört werden, sobald der Wasserspiegel die Höhe der Fensterunterkante erreicht und so der direkte Anprall von Schwemmholz sowie das direkte Anströmen des Wasser-Feststoffgemisches an die Fensterscheibe ermöglicht wird.

Das Intensitätskriterium der Fließgeschwindigkeit verliert in diesem Zusammenhang einen Teil seiner Bedeutung für die Analyse der physischen Vulnerabilität, weil bereits für die minimale Grenzfließgeschwindigkeit von dynamischen Überschwemmungen von 1 m/s mit dem Bruch von Fensterscheiben zu rechnen ist. Zentral für die potentielle Zerstörung und das grossflächige Eindringen und somit für die physische Vulnerabilität des Gebäudes ist also der Umstand, ob der Wasserspiegel die Fenster als äusserst vulnerable Gebäudeelemente erreicht oder nicht.

Die Höhe des Wasserspiegels wird dabei neben der Fliesstiefe auch durch die Lage der Sohle während der Überschwemmung mitbestimmt. Durch Akkumulation und erneute Erosion von Sediment verändert sich dabei die Lage der Sohle während eines Ereignisses ständig. Die Mächtigkeit des abgelagerten Materials zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmt gleichzeitig die exakte Lage der Sohle zu diesem Zeitpunkt. Wie in Abbildung 45 dargestellt, wird eine Fensterscheibe 1 m über dem Boden bei einer Ablagerungshöhe von 0.2 m und einer Fliesstiefe von 0.6 m nicht durch den Wasserspiegel erreicht. Liegt die Sohle zum Anströmzeitpunkt jedoch durch eine grössere Ablagerungshöhe von 0.8 m weiter oben, wird die Fensterscheibe bei gleicher Fliesstiefe von 0.6 m erreicht.

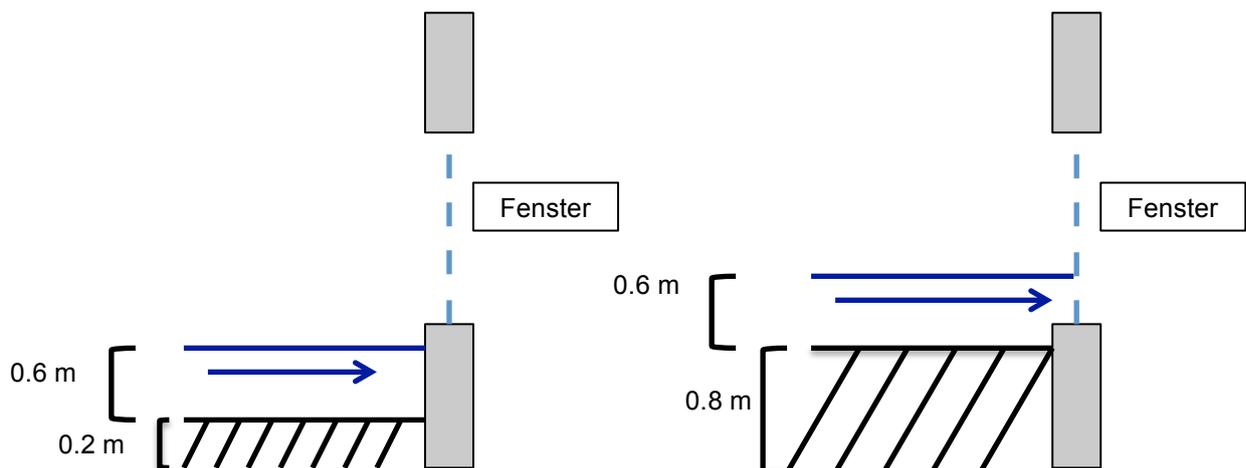


Abbildung 45: Die Wasserspiegellage während eines Überschwemmungsereignisses ist von der Ablagerungsmächtigkeit und damit von der Lage der Sohle abhängig.

Deshalb bestimmt nicht die Fliesstiefe allein, ob das Fenster durch die Überschwemmung erreicht und damit womöglich zerstört wird. Vielmehr ist es die Summe aus momentaner Fliesstiefe und der zeitgleichen Ablagerungshöhe welche die effektive Wirkungshöhe einer dynamischen Überschwemmung und damit das Erreichen der Fensters determiniert. In der Folge wird bei der Bestimmung der Intensitätsklassen deshalb von der effektiven Wirkungshöhe der Überschwemmung als Intensitätskriterium ausgegangen.

Zusammenfassend werden für die vorliegende Arbeit also Ablagerungshöhen und Fliesstiefen während des Ereignisses sowie eine zu erreichende minimale Fließgeschwindigkeit von 1 m/s als primäre Intensitätswerte aus der Simulation verwendet. Das Kriterium der Fließgeschwindigkeit findet seine Berechtigung vor allem bei feststoffführenden Überschwemmungen, bei welchen auch distale Bereiche des Schwemmfächers betroffen sind. Hier kann es, wie die Prozessrekonstruktion in Baltschieder zeigte, aufgrund der Aufweitung, Verteilung und des Rückstaus des fließenden Wassers durch die Uferdämme des Vorfluters zu geringeren Fließgeschwindigkeiten mit statischem Charakter kommen. Im folgenden Unterkapitel wird nun erläutert, wie die primären Intensitätswerte konkret bestimmt und das Kriterium der effektiven Wirkungshöhe berechnet wurde.

5.3.5 Bestimmung der Intensitätswerte und -kriterien für jedes Gebäude

Um die effektive Wirkungshöhe während der Überschwemmung zu bestimmen, sind die als Textdatei von BASEMENT ausgegebenen Ablagerungshöhen und Fliesstiefen am Monitoringpunkt des jeweiligen Gebäudes in Excel exportiert worden. Im Excel sind dann die zeitlich korrespondierenden Ablagerungshöhen und Fliesstiefen für jeden Zeitschritt, wie in Tabelle 13 anhand eines fiktiven Beispiels dargestellt, addiert worden, um die effektive Wirkungshöhe zu erhalten. Die über die gesamte Zeitreihe maximale effektive Wirkungshöhe ist so bestimmt und anschliessend für die Zuordnung der Gebäude zu einer Intensitätsklasse verwendet worden.

Als weiteres Kriterium für die spätere Klassenzuteilung ist die Fließgeschwindigkeit verwendet worden. Dabei wurde jeweils die Fließgeschwindigkeit vom jeweiligen Gebäude zum gleichen Zeitpunkt wie die berechnete maximale Summe aus zeitgleicher Ablagerungshöhe und Fliesstiefe in Excel bestimmt. Es ist zwingend notwendig, dass dabei der zur Wirkungshöhe zeitlich korrespondierende Wert der Fließgeschwindigkeit verwendet wird. Die Fließgeschwindigkeit wird nämlich in dem Moment entscheidend, in dem die Fenster als vulnerables Element durch eine entsprechende effektive Wirkungshöhe erreicht werden. In den Zeitschritten davor, bei geringeren effektiven Wirkungshöhen, führen auch höhere Fließgeschwindigkeiten nur zu Schäden an der Gebäudehülle (Putz etc.), da Mauern weniger vulnerabel reagieren.

Nachfolgend ist die Bestimmung der Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit an einem fiktiven Beispielgebäude dargestellt, um das Vorgehen zu verdeutlichen.

Tabelle 13: Übersicht über die Bestimmung der Werte der effektiven Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit als Intensitätskriterien. Die beiden schlussendlich für die anschließende Klassierung verwendeten Werte sind gelb markiert.

Hours [h]	Ablagerungshöhe [m]	Fliesstiefe [m]	Effektive Wirkungshöhe [m]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
0.000	0.310	0.343	0.653	0.577
0.139	0.349	0.310	0.659	0.589
0.278	0.382	0.327	0.709	0.590
0.417	0.403	0.305	0.708	0.594
0.556	0.420	0.286	0.706	0.599
0.694	0.445	0.309	0.754	0.664
0.833	0.472	0.308	0.780	0.733
0.972	0.480	0.352	0.832	0.864
1.111	0.546	0.310	0.856	0.832
1.250	0.693	0.183	0.876	0.836
1.389	0.820	0.079	0.898	0.928
1.528	0.813	0.092	0.904	0.873
...

5.4 Herleitung des Klassierungssystems

In einem nächsten Schritt ist nun mit Hilfe der Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe und zeitgleichen Fließgeschwindigkeit ein Klassierungssystem hergeleitet worden. Das vorgeschlagene Klassierungssystem basiert dabei auf drei Intensitätsklassen. Nachfolgend wird nun näher auf die Herleitung und die Definition der Klassengrenzen dieses Klassierungssystems eingegangen. Die Zuordnung der untersuchten Gebäude zu den Intensitätsklassen ist der letzte Schritt der Vulnerabilitätsanalyse von Prozessseite her. Abbildung 46 gibt eine Übersicht über den methodischen Zusammenhang dieses Teilschrittes.

PHYSISCHE VULNERABILITÄT

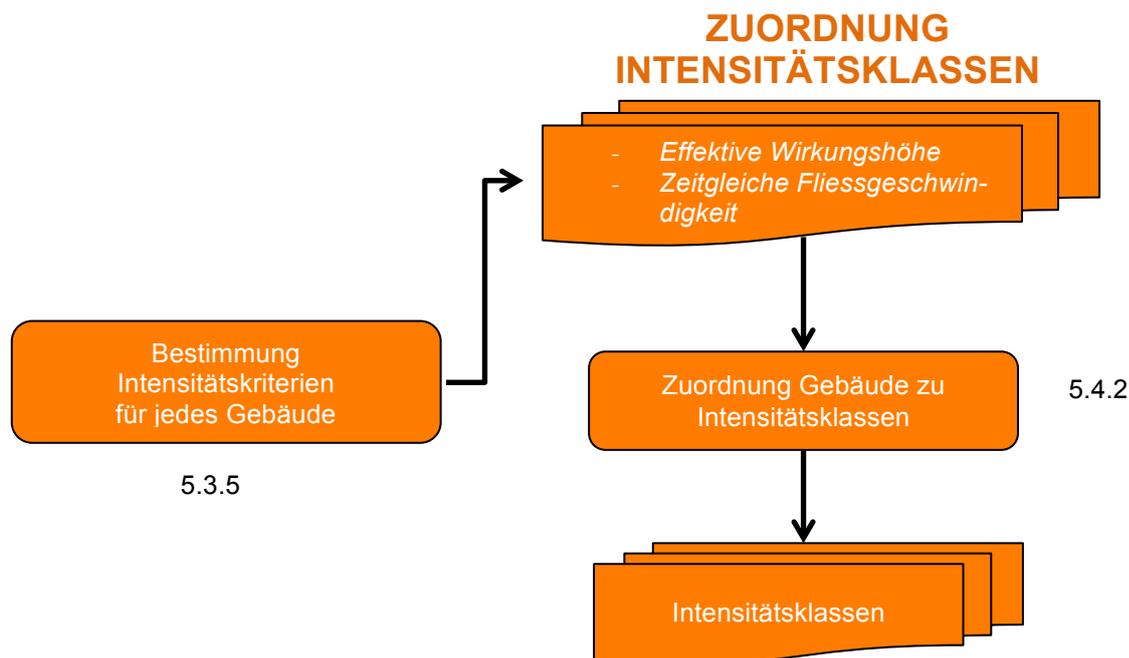


Abbildung 46: Schematische Übersicht über die Zuordnung der Gebäude zu den Intensitätsklassen aufgrund der Intensitätskriterien "effektive Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit" als Teilschritt zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität.

5.4.1 Herleitung der Klassengrenzen

Zur Bestimmung von statistischen Kennwerten der Schadenempfindlichkeiten sind die drei Klassen schwache, mittlere und starke Schadenintensität auf Grundlage der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Intensitätskriterien gebildet worden. Die Einteilung in drei Klassen ermöglicht ebenfalls einen Vergleich zu den primär auf der Gefährdung des Menschen basierenden drei Intensitätsklassen gemäss Loat und Petraschek (1997).

Die effektive Wirkungshöhe muss > 1 m sein, um Fenster als Gebäudeöffnungen potentiell durch die definierten Einwirkungen der dynamischen Überschwemmung zu zerstören und damit zum Eindringen von Feststoffen und Wasser ins Gebäudeinnere zu führen. Die Höhe von 1 m kommt dabei mit Blick auf die durchschnittliche Höhe von Fensterunterkanten von 1 m zu Stande. Zwar gibt es in der Schweiz keine Norm bezüglich der minimalen Einbauhöhe der Fenster, aber bereits behandelte Forschungsergebnisse (Fuchs et al. 2007; Fuchs und Heiss, 2008; Fuchs, 2009; Totschnig et al., 2011; Paphoma-Köhle, 2012a;) gehen von dieser Höhe der Fensterunterkante vom Boden gemessen aus. Auch Totschnig und Fuchs (2012) schreiben in ihrer Studie, dass sich „Fensteröffnungen in der Regel in einer Höhe von rund 1 m befinden“. 1 m effektive Wirkungshöhe stellt damit eine Klassengrenze zwischen schwacher und mittlerer Intensität dar. Bei Wirkungshöhen < 1 m dringen keine Feststoffe und Wasser über die Fenster ein, wodurch entsprechend geringere Schäden resultieren, was wiederum eine Zuordnung zur schwachen Intensitätsklasse rechtfertigt.

Die Klassengrenze zwischen mittlerer und starker Intensität ist ab einer effektiven Wirkungshöhe von 3.65 m gesetzt worden. Auf diese Höhe kommt man, wenn man zur gesetzlich in der Schweiz vorgeschriebenen Mindestraumhöhe von 2.40 m (Mäder, 2001) eine durchschnittliche Bodendicke von 0.25 m und einen weiteren Meter bis zur Fensterunterkante der oberen Etage addiert. Ab dieser Wirkungs-

höhe werden, wie in Abbildung 47 dargestellt, auch Fenster in der zweiten Etage von Wohngebäuden durch die Überschwemmung erreicht. Dadurch nehmen der Schaden und damit die Schadenempfindlichkeit entsprechend stark zu. Nach Oberndorfer (2007) ist bei derart hohen Intensitäten von einem Totalschaden des Gebäudes auszugehen, da der entstehende Schaden dem monetären Wert des Gebäudes gleichzusetzen ist. Bei der Intensitätsklasse stark ist dementsprechend von einem Schadenempfindlichkeitswert auszugehen, der gegen 1 strebt.

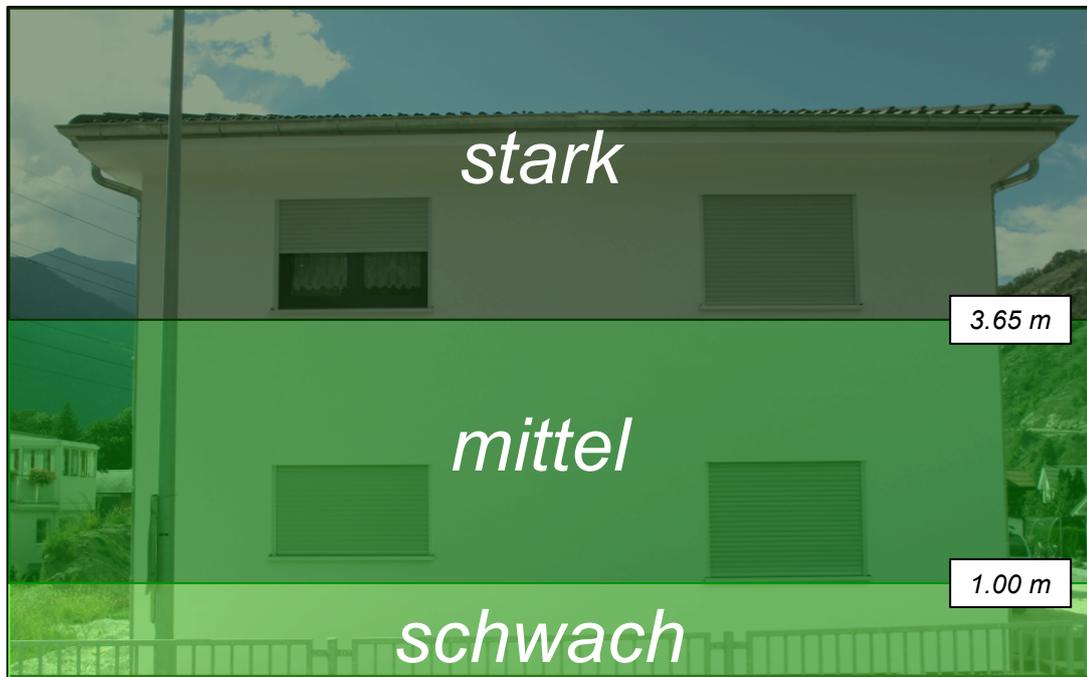


Abbildung 47: Das Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe visualisiert an einer Gebäudefassade mit schwacher Intensität (hellgrün < 1 m), mittlerer Intensität (mittelgrün > 1 und < 3.65) und starker Intensität (dunkelgrün > 3.65 m).

Als weiteres Intensitätskriterium für die Zuteilung zur jeweiligen Schadensintensität muss mindestens eine Fließgeschwindigkeit von 1 m/s erreicht werden. Diese Fließgeschwindigkeit muss nämlich wie in Kapitel 5.3.3.1 dargelegt beispielsweise erreicht werden, damit auch noch kleine Schwemmholzteile zu einem Scheibenbruch durch die kinetische Anprallenergie führen können. Bei geringeren Fließgeschwindigkeiten ist damit nicht mehr zwingend zu rechnen. Weiter ist 1 m/s nach Definition von Egli (2007) die minimale Fließgeschwindigkeit von dynamischen Überschwemmungen. Ausserdem zeigt das Ereignis in Baltschieder, dass die Überschwemmung sowohl sehr hohe Fließgeschwindigkeiten am Kegelhal, als auch fast statischen Charakter im vom Kegelhal weiter entfernten Bereich aufwies. Mit dem Intensitätskriterium der minimalen Fließgeschwindigkeit von 1 m/s kann so bei der Klassenzuordnung berücksichtigt werden, dass in Bereichen mit derart geringen Fließgeschwindigkeiten die Zerstörung der Scheibe durch Anprall relativ unwahrscheinlich ist. Im folgenden Unterkapitel werden auf Grundlage der effektiven Wirkungshöhe und der Fließgeschwindigkeit die Klassengrenzen gesetzt.

5.4.2 Definition der Klassengrenzen Intensitätsklassen

Effektive Wirkungshöhen < 1 m werden der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet. Eine effektive Wirkungshöhe die zwischen 1 m und 3.65 m liegt, bei der aber die minimale Fließgeschwindigkeit von 1 m/s nicht erreicht wird, führt ebenfalls zur Zuordnung in die schwache Intensitätsklasse.

Eine effektive Wirkungshöhe von 1 m – 3.65 m in Kombination mit einer entsprechenden Fließgeschwindigkeit von ≥ 1 m/s führt zur Zerstörung der Fenster im Erdgeschoss, dem grossflächigen Eindringen von Wasser ins Gebäudeinnere und damit zur Zuordnung einer mittleren Schadensintensität. Schadenobjekte, bei welchen die effektive Wirkungshöhe ≥ 3.65 m ist, die minimale Fließgeschwindigkeit von 1 m/s aber nicht erreicht wird, werden entsprechend unten stehendem Schema ebenfalls der mittleren Schadensintensität zugeordnet.

Effektiven Wirkungshöhen > 3.65 m führen auch in der ersten Etage eines Hauses potentiell zum Bruch von Fensterscheiben und damit zur Zuordnung zur starken Schadensintensität. Während im Erdgeschoss bei Wirkungshöhen dieser Magnitude alleine aufgrund des statischen Drucks von Wasser und abgelagertem Geschiebe vom Bruch auszugehen ist, muss das Kriterium der minimalen Fließgeschwindigkeit von 1 m/s dennoch für die Zuordnung in die starke Intensitätsklasse erfüllt sein, damit Fenster in der oberen Etage ebenfalls zu Bruch gehen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Schwache, mittlere und starke Schadensintensität mit der Beschreibung des entstehenden Schadens und den Kriterien, welche zur Zuteilung in diese Klasse führen.

Intensitätsklassen		
SHWACHE SCHADENSINTENSITÄT	MITTLERE SCHADENSINTENSITÄT	STARKE SCHADENSINTENSITÄT
Schäden schwerpunktmässig an der Gebäudehülle. Fenster im Erdgeschoss nicht zerstört	Fenster im Erdgeschoss werden zerstört => Schäden dort zusätzlich auch im Gebäudeinneren	Fenster in der ersten Etage zerstört => Schäden zusätzlich auch im Gebäudeinneren der ersten Etage
$h_{\max} < 1$ m	h_{\max} 1 - 3.65 m und $v_{\max} > 1$ m/s	$h_{\max} > 3.65$ m und $v_{\max} > 1$ m/s
oder	oder	
h_{\max} 1 – 3.65 m und $v_{\max} < 1$ m/s	$h_{\max} > 3.65$ m und $v_{\max} < 1$ m/s	

5.5 Bestimmung der physischen Vulnerabilität

Nach der bereits beschriebenen Simulation, Kalibrierung und der Zuordnung der Gebäude zu einer der drei Intensitätsklassen, folgt als weiterer Schritt in der Methodik dieser Vulnerabilitätsanalyse die Bestimmung der Schadenempfindlichkeit für jedes der untersuchten Wohngebäude. Nach dem die Schadenempfindlichkeit bestimmt und das betroffene Gebäude lokalisiert war, wurde die lokalisierte Schadenempfindlichkeit jedes Gebäudes seiner bereits bestimmten Intensitätsklasse zugerechnet. So konnten schliesslich für jede der drei Intensitätsklassen statistische Kennzahlen für die Schadenempfindlichkeit wie Mittelwert oder Median bestimmt werden. Abbildung 48 gibt einen schematischen Überblick über das Vorgehen bei diesem letzten methodischen Schritt. Vertiefte Informationen zum konkreten Vorgehen finden sich jeweils unter den in der Abbildung 48 angegebenen Kapiteln. Eine komplette Übersicht über die gesamte Methode findet sich in den Resultaten unter Kapitel 6.7.

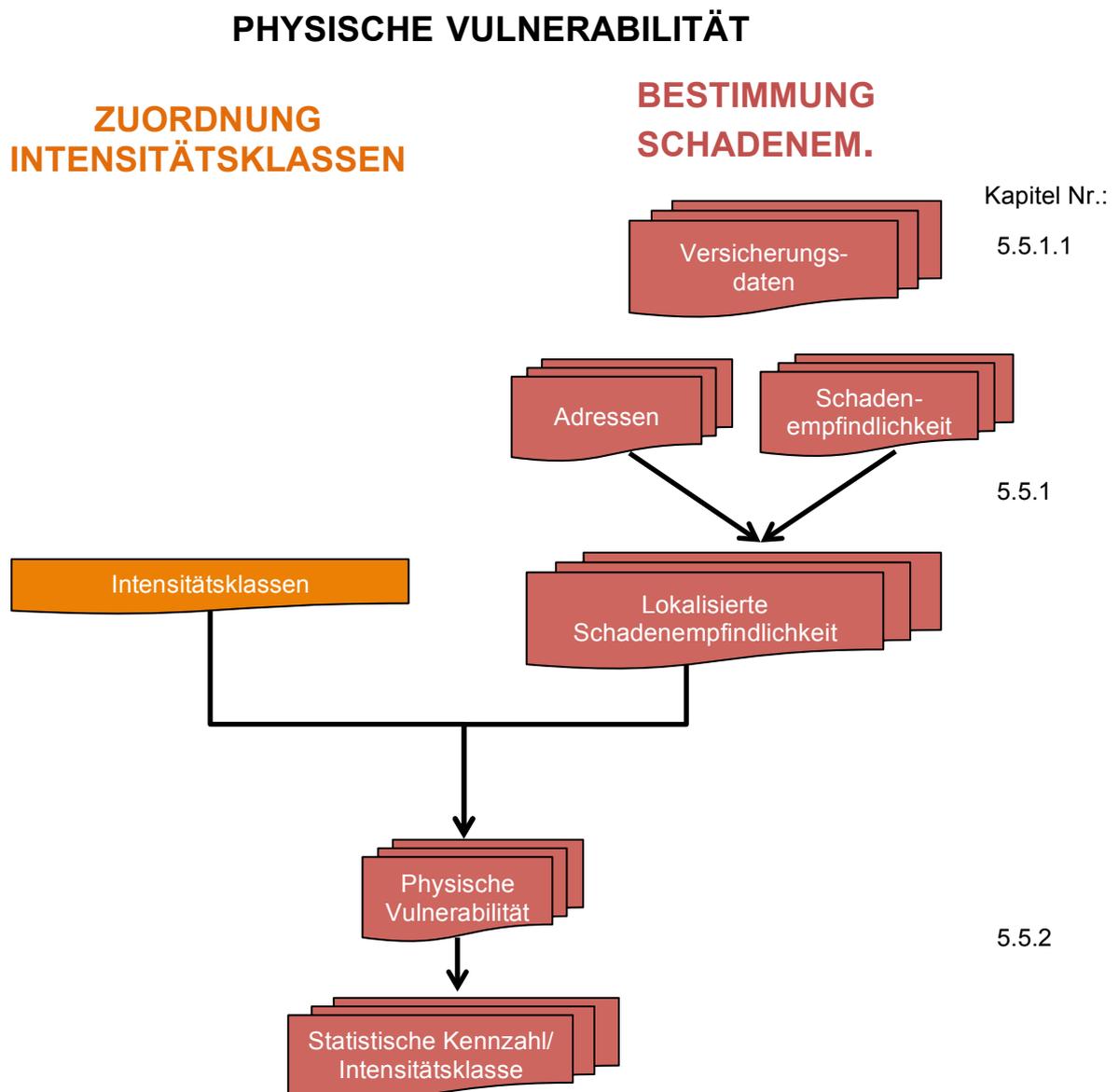


Abbildung 48: Schematische Übersicht über die einzelnen methodischen Schritte bei der Bestimmung der Schadenempfindlichkeit und der physischen Vulnerabilität.

5.5.1 Bestimmung der Schadenempfindlichkeit

Zur Bestimmung der Schadenempfindlichkeit ist auf Versicherungsdaten der insgesamt 29 Versicherungspolice von Gebäuden aus dem Portfolio der Mobiliarversicherung in Baltschieder im Jahr 2000 zurückgegriffen worden. Die Mobiliar stellte dabei ausschliesslich die Daten von Versicherungspolice, welche aufgrund der Datenführung aus dem Jahr 2000 mit relativ grosser Sicherheit exakt lokalisiert werden konnten, zur Verfügung.

Aus Datenschutzgründen wurde die Schadenempfindlichkeit jeder Versicherungspolice bereits von der Mobiliar wie in Kapitel 3.2.1 behandelt als Quotient der Schadensumme und des Versicherungswertes berechnet. Für die vorliegende Arbeit sah die Datengrundlage für die weitere Analyse jeder Police dementsprechend wie beispielhaft in der nachfolgenden Tabelle dargestellt aus. Um die Datenschutzbestimmungen zu respektieren werden in der Folge keine Adressen und Koordinaten für die Gebäude des Mobiliarportfolios angegeben.

Tabelle 15: Beispiel eines Datensatzes wie er von der Mobiliar abgegeben wurde.

Adresse	Schadenempfindlichkeit	X - Koordinate	Y - Koordinate
Musterstrasse 5	0.57	000000	000000

Für eine physische Vulnerabilitätsanalyse sind ausschliesslich die Gebäude von Interesse, welche auch von der physischen Einwirkung eines schadenverursachenden Prozesses während des Ereignisses betroffen waren. Gemäss der Kalibrierungsgrundlage waren 6 Gebäuden aus dem Portfolio der Mobiliar aufgrund ihrer Lage nicht vom Überschwemmungsereignis im Jahr 2000 betroffen. Die Daten dieser 6 Gebäude wurden deshalb für die weitere Analyse der physischen Vulnerabilität nicht berücksichtigt.

Bei zwei Mehrfamilienhäusern lagen für das gleiche Gebäude am gleichen Ort mehrere Versicherungspolice vor, da unterschiedliche Gebäudeteile und zum Teil Wohnungen in unterschiedlichen Versicherungspolice versichert worden sind. In diesem Fall wurde ausschliesslich ein Schadenempfindlichkeitswert pro Gebäude verwendet. Der entsprechende Schadenempfindlichkeitswert wurde aus dem Mittelwert der Schadenempfindlichkeit der einzelnen Police gebildet. Infolge von solchen Zusammenlegungen und der oben beschriebenen Streichung von Gebäuden, welche nicht betroffen waren, reduzierte sich der Gebäudedatensatz schliesslich auf 20 Gebäude. Auf Grundlage der Daten dieser 20 Gebäude ist schliesslich die vorliegende Fallstudie verfasst worden. Wie nachfolgend in Abbildung 49 dargestellt, wiesen dabei 6 Gebäude eine Schadenempfindlichkeit von 0 und 14 Gebäude eine Schadenempfindlichkeit von > 0 auf.

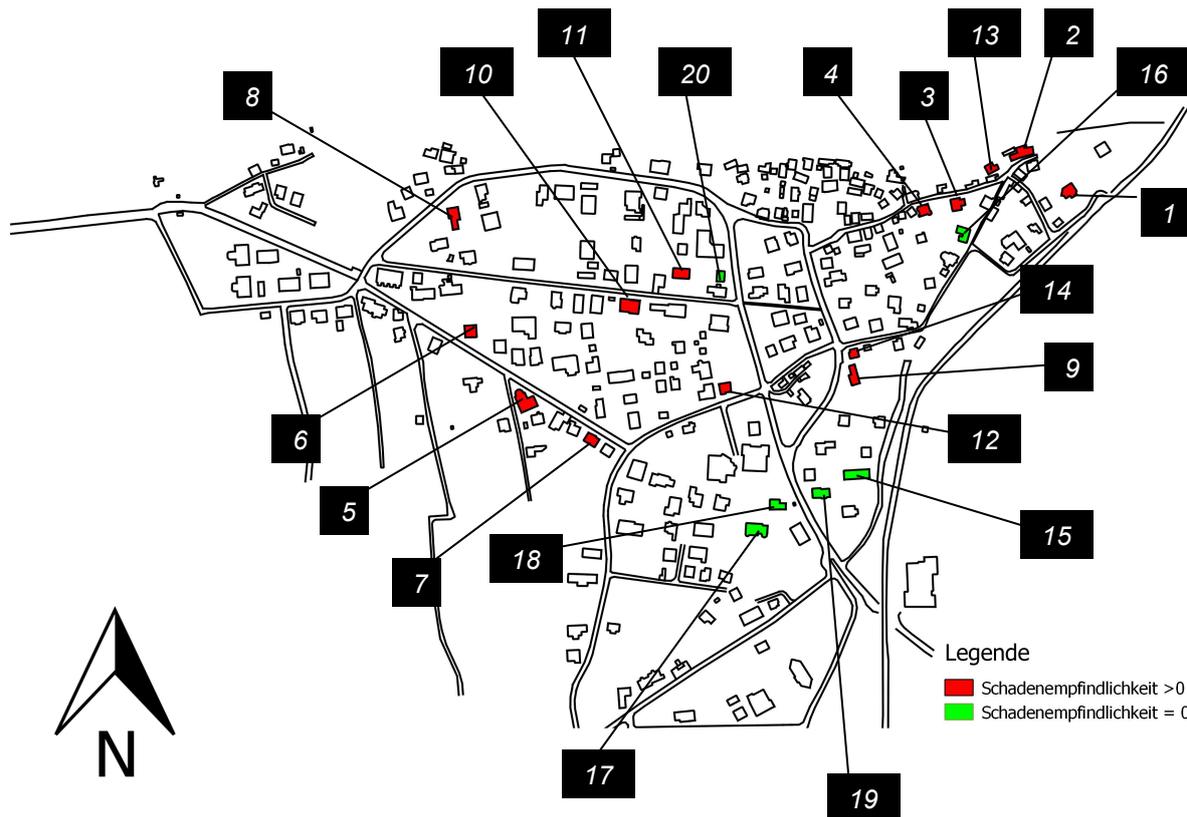


Abbildung 49: Für die Studie verwendete, durchnummerierte betroffene Gebäude aus dem Portfolio der Mobiliar. In Grün Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 und in Rot Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von > 0.00.

5.5.1.1 Methode zur Bestimmung der Schadenempfindlichkeit, des Gebäudewertes und der Schadensumme

Der monetäre Wert der Wohngebäude ist durch professionelle Gebäudeschätzer des schweizerischen Versicherungsverbandes (SVV) erhoben worden. Die Schätzung eines Wohngebäudes wird alle 10 bis 15 Jahre überprüft und gegebenenfalls angepasst. Der Wert des Gebäudes wird dabei auf Grundlage der Wiederherstellungskosten der vorhandenen Bausubstanz in gleicher Bauweise und Bauqualität, am gleichen Standort und mit vergleichbaren baulichen Eigenschaften bestimmt (Künzler, 2014). Nicht berücksichtigt werden Kosten im Zusammenhang mit dem Baugrund, Arbeiten in der Umgebung des Gebäudes, dem Bauland und Baunebenkosten (Künzler, 2014).

Die Schadensumme für jedes Gebäude bezieht sich auf die von der Mobiliar ausbezahlten Geldwerte für Elementarschäden an Gebäuden. Die Geldwerte entsprechen dabei jeweils den Rechnungsbeträgen der Handwerker. Darin enthalten sind Reparatur- und Wiederaufbaukosten an der Gebäudehülle (Mauern, Fenster, Putz etc.) und an Wänden, Bodenbelägen im Innern sowie die Entsorgung und Räumung von Feststoffen und beschädigten Gebäudeteilen. Fahrhabe wie Einrichtungsgegenstände oder Möbel sind in den Schadendaten nicht aufgeführt.

5.5.2 Bestimmung der Physischen Vulnerabilität

Zur schlussendlichen Bestimmung der physischen Vulnerabilität wurden die bestimmten Schadenempfindlichkeiten für jedes betroffene Gebäude der jeweiligen Intensitätsklasse zugeordnet. Die Zuordnung eines Gebäudes und seiner Schadenempfindlichkeit zu einer der drei Intensitätsklasse erfolgte dabei, wie in Kapitel 5.4.2 behandelt, auf Grundlage der maximalen effektiven Wirkungshöhe und der zeitgleichen Fließgeschwindigkeit.

Mit den Schadenempfindlichkeiten einer jeden Klasse sind schliesslich für jede Intensität (schwach, mittel, stark) die statistischen Kennwerte der physischen Vulnerabilität Mittelwert, Median, Maximum, Minimum, Spannweite, 0.25 - Quartil, 0.75 - Quartil und der Interquartilsabstand bestimmt worden. Als Verknüpfung der Schadenempfindlichkeit mit einer definierten Intensitätsklasse charakterisieren diese Werte die physische Vulnerabilität der untersuchten Wohngebäude in Baltschieder für diese Intensitätsklasse.

5.6 Vergleich mit dem Intensitätskriterium $v \cdot h$

Die Zuordnung der Gebäude und ihren Schadenempfindlichkeiten zu den drei Intensitätsklassen schwach, mittel und stark wurde mit dem Intensitätskriterium $v \cdot h$ des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997) wiederholt. So konnte die physische Vulnerabilität zwischen dem schadens- und gefährdungsbasierten Klassierungssystem verglichen werden. Bis auf die Bestimmung des Intensitätskriteriums und die Klassenzuordnung war das methodische Vorgehen analog zur vorangehend beschriebenen Vulnerabilitätsanalyse mit der effektiven Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit. Aus diesem Grund wird im folgenden Unterkapitel auch nur auf das konkrete Vorgehen bei der Bestimmung des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ mit Hilfe der Intensitätswerte von Fliesstiefe (h) und -geschwindigkeit (v) eingegangen.

5.6.1 Bestimmung Intensitätskriterium $v \cdot h$

Für die Bestimmung des Kriteriums $v \cdot h$ sind dieselben BASEMENT-Simulationsergebnisse wie bei der auf effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Vulnerabilitätsanalyse verwendet worden. Gemäss der aktuell gängigen Praxis wurde zur Bestimmung des Produktes $v \cdot h$ für jedes Gebäude jeweils mit den über das Ereignis zeitgleich maximal auftretenden Fliesstiefen und -geschwindigkeiten gerechnet (Kipfer, 2014). Der Zeitpunkt mit zeitgleich maximalen Fliesstiefen und -geschwindigkeiten während eines Ereignisses stimmt dabei meist nicht mit dem Zeitpunkt der effektiven Wirkungshöhe überein. Aus diesem Grund unterscheiden sich Fliesstiefen und -geschwindigkeiten beim Kriterium $v \cdot h$ in der Regel von den für die Berechnung der effektiven Wirkungshöhe verwendeten Fliesstiefen und -geschwindigkeiten. Für die Zuordnung zu den Intensitätsklassen sind Klassengrenzen gemäss Loat und Petraschek (1997) (siehe Tabelle 1) verwendet worden. Die anschliessende Verknüpfung der Prozessintensitätsklasse mit der Schadenempfindlichkeit und die Berechnung der statistischen Kennzahlen erfolgten dann wieder analog zum in 5.5 beschriebenen Verfahren.

5.7 Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparameter mit einem Einfluss auf die physische Vulnerabilität

Zur Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparametern, welche in Baltschieder einen Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit und damit die physische Vulnerabilität der Wohngebäude gehabt haben könnten, wurden die Gebäude mit Minima und Maxima der Schadenempfindlichkeit und ihre Umgebung in der jeweiligen Intensitätsklasse miteinander verglichen. Es wurden dafür die Werte der auf effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Intensitätsklassen verwendet. Durch den Vergleich der Gebäude mit Minimal- und Maximalwerten der Schadenempfindlichkeit und ihrer Umgebung sollten sich einerseits allfällige Einflussfaktoren von Objekt- und Umgebungsseite her besonders akzentuiert manifestieren. Andererseits wird durch die klasseninterne Betrachtung der Einfluss der Intensität des Prozesses minimiert, da hier Unterschiede bezüglich der Prozessintensität aufgrund der Klassierung weniger stark ausgeprägt sind. Für allfällige Unterschiede können demnach das Vorhandensein oder Fehlen von Objekt- und Umgebungsparameter verantwortlich gemacht werden.

Im Feld sind jeweils Charakteristika wie die Lage und Art von Gebäudeöffnungen und abschirmende Objekte wie Zäune oder Mauern in der Umgebung an der durch die Überschwemmung dominant angeströmten Gebäudeseite gesammelt worden. Zur Bestimmung der angeströmten Gebäudeseite wurden wie bereits bei der Platzierung des Monitoringpunktes die Simulationsergebnisse von BASEMENT herangezogen.

Es wurde bewusst auf die angeströmte Gebäudeseite fokussiert, da hier die Magnitude der Einwirkungen auf das Gebäude am höchsten ist und somit hier die Wahrscheinlichkeit zur Zerstörung von Fensterscheiben und damit dem grossflächigen Eindringen von Wasser und Feststoffen ebenfalls als am höchsten angesehen werden kann.

Die gesammelten Charakteristika der Gebäude mit minimalen und maximalen Schadenempfindlichkeitswerten sind dann innerhalb der jeweiligen Intensitätsklassen verglichen worden. So wurde versucht, entscheidende Einflussfaktoren in Bezug auf das Objekt selber oder seine unmittelbare Umgebung zu identifizieren, welche als Erklärung für die sich unterscheidenden physischen Vulnerabilitäten herangezogen werden können.

KAPITEL 6: RESULTATE

Die in diesem Kapitel in den Resultatetabellen verwendete Nummerierung für jedes der untersuchten Gebäude bezieht sich jeweils auf die in Abbildung 49 eingeführte Nummerierung. Inhaltlich ist das Kapitel wie folgt strukturiert:

Zunächst werden die Simulationsergebnisse der Rekonstruktion der Prozessintensität für jedes der betroffenen Gebäude und beide Klassierungssysteme in 6.1 dargelegt. Anschliessend werden in 6.2 und 6.3 die Resultate der Zuordnung zu den Intensitätsklassen und die Schadenempfindlichkeitswerte der untersuchten Wohngebäude in Baltschieder aufgelistet. Die Ergebnisse der Zuordnung zu den Intensitätsklassen sind dabei jeweils für das neu entwickelte Klassierungssystem und das Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) festgehalten. In Kapitel 6.4 sind dann wiederum für beide Klassierungssysteme die ermittelten statistischen Kennzahlen der physischen Vulnerabilität beschrieben. Im darauffolgenden Kapitel werden diese Kennzahlen der beiden Klassierungssysteme dann miteinander verglichen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede festzustellen. Die In Kapitel 6.2 und 6.4 verwendete Farbskalierung lehnt sich an die in der Praxis häufig verwendeten Farben hellgrün für schwache Intensität, mittelgrün für mittlere Intensität und dunkelgrün für starke Intensität an (Pittet, 2012).

Nach dem Block mit den Ergebnisse zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität folgt dann die Präsentation der identifizierten Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität in Baltschieder in Kapitel 6.6. Zum Schluss des Kapitels wird in 6.7 noch einmal eine Übersicht über die im Rahmen dieser Fallstudie entwickelte und angewendete Methode zur Bestimmung der physischen Vulnerabilität mit BASEMENT gegeben.



Titelbild von Kapitel 6: Zerstörtes Fenster eines betroffenen Gebäudes nach dem Ereignis vom 15. Oktober 2000 in Baltschieder (Photograph unbekannt).

6.1 Ergebnis der Rekonstruktion der Prozessintensität mit BASEMENT

Durch den im Methodenteil beschriebenen Kalibrierungsprozess konnte schliesslich die Simulationseinstellungen so angepasst werden, dass eine möglichst konsistente Verteilung der Ablagerungshöhen simuliert werden konnte. Die Simulationseinstellungen der wichtigsten Parameter des kalibrierten Endergebnisses können im Anhang eingesehen werden.

Auf Grundlage dieser Einstellungen wurde mit BASEMENT eine Simulation durchgeführt, bei welcher die anderen benötigten Intensitätskriterien wie Fliesstiefe und -geschwindigkeit für das ganze Ereignis ausgegeben wurden. Nachfolgend sind exemplarisch Simulationsergebnisse von Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses dargestellt (siehe Abbildung 50, 51 und 52).

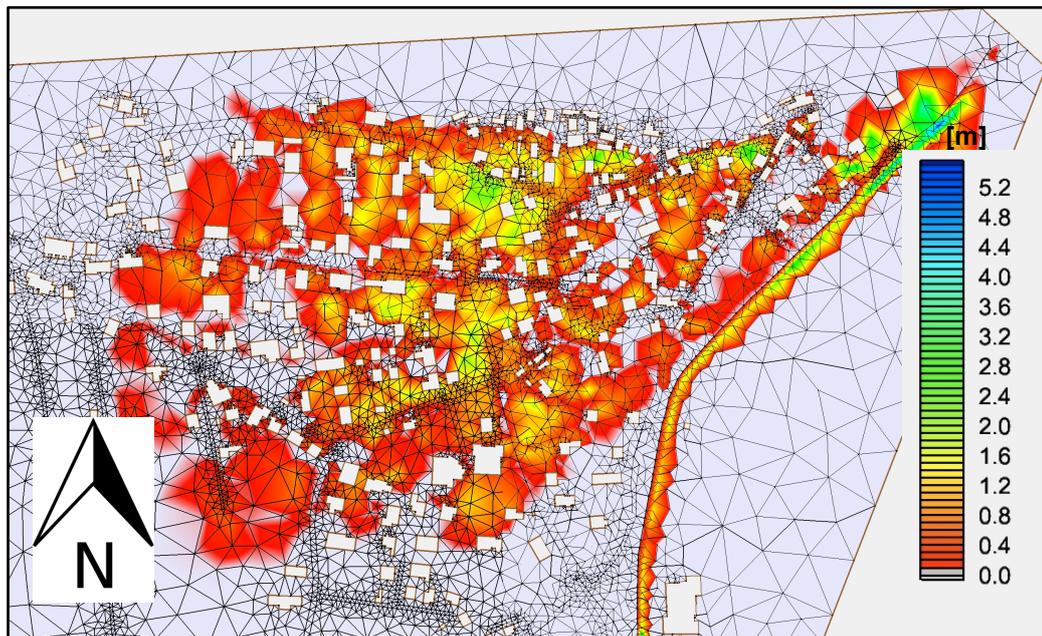


Abbildung 50: Darstellung der berechneten Ablagerungshöhen rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.

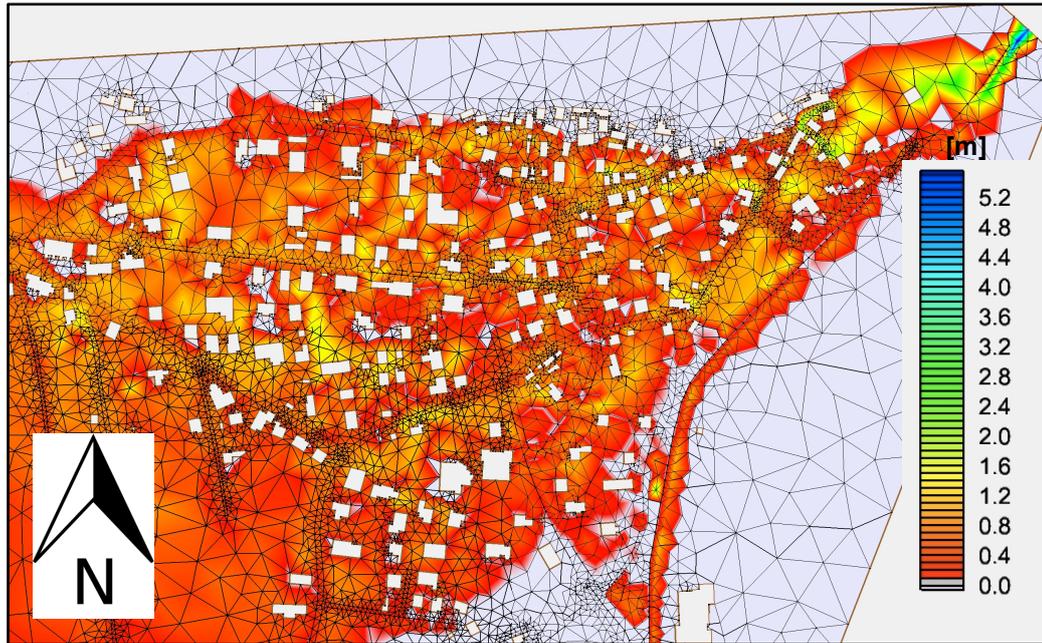


Abbildung 51: Darstellung der berechneten Fliesstiefen rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.

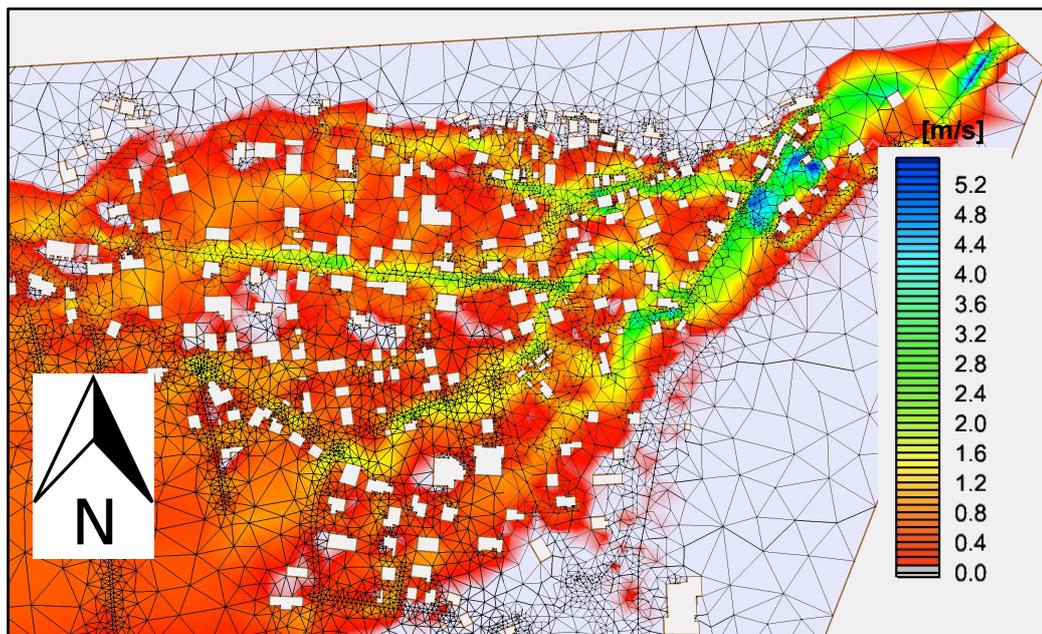


Abbildung 52: Darstellung der berechneten Fließgeschwindigkeiten rund 6 Stunden nach Beginn des Ereignisses.

6.1.1 Intensitätswerte für das Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit

In Tabelle 16 sind die einzelnen Intensitätswerte für das auf Ablagerungshöhe, Fliesstiefe und -geschwindigkeit basierende Klassierungssystem der 20 in Abbildung 49 dargestellten Wohngebäude aufgelistet. Eine detaillierte Übersicht über die Intensitätswerte für jeden simulierten Zeitschritt über das gesamte Ereignis und jedes der 20 untersuchten Gebäude findet sich auf der beigelegten CD. Während sich die unten aufgeführten Werte der Fliesstiefe relativ ausgeglichen präsentieren, variieren

die Ablagerungshöhen mitunter stark. So schwanken die Ablagerungshöhen je nach Gebäude zwischen 0.00 m und 2.62 m, während sich die Fliesstiefen zwischen 0.22 m und 0.69 m bewegen.

Weiter fällt auf, dass die zeitgleichen Fließgeschwindigkeiten nicht durchwegs > 1 m/s sind, wie es bei einer dynamischen Überschwemmung zu erwarten wäre. 10 Gebäude weisen eine Fließgeschwindigkeit von < 1 m/s auf, was in diesen Bereichen einen, zumindest zu diesem Zeitpunkt, eher statischen Charakter der Überschwemmung belegt.

Für Gebäude Nr. 13 konnte weder Ablagerungshöhe, Fliesstiefe noch –geschwindigkeit bestimmt werden, da die dynamische Überschwemmung diesen Bereich in der Simulation nicht tangierte.

Tabelle 16: Bestimmte Intensitätswerte an der angeströmten Gebäudewand der 20 untersuchten Wohngebäude.

Nr.	Fliesstiefe [m]	Ablagerungshöhe [m]	Effektive Wirkungshöhe [m]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
1	0.54	2.56	3.10	1.29
2	0.33	1.81	2.14	2.07
3	0.35	2.41	2.76	1.08
4	0.53	0.52	1.05	1.34
5	0.69	0.01	0.70	1.43
6	0.58	0.05	0.63	1.34
7	0.37	0.20	0.57	1.15
8	0.22	0.29	0.51	0.08
9	0.41	0.00	0.41	0.24
10	0.35	0.75	1.10	0.42
11	0.39	0.26	0.65	0.34
12	0.30	0.48	0.78	1.09
13	-	-	-	-
14	0.63	0.00	0.63	0.70
15	0.33	0.00	0.33	0.36
16	0.69	2.92	3.61	1.17
17	0.68	0.03	0.71	0.15
18	0.31	0.55	0.86	0.83
19	0.44	0.00	0.44	0.40
20	0.41	0.00	0.41	0.21

In Abbildung 53 ist die räumliche Verteilung der zeitgleich über das Ereignis maximalen effektiven Wirkungshöhen für alle 20 untersuchten Gebäude visualisiert. Als einziges dieser 20 untersuchten Wohngebäude konnten für Gebäude Nr. 13 in der Simulation keine Intensitätswerte bestimmt werden, da das Gebäude laut Simulation nicht vom Ereignis direkt betroffen war. Es fällt auf, dass mit Ausnahme von Gebäude Nr. 13, im unmittelbar an den Kegelhalbs angrenzenden Bereich alle Gebäude von einer effektiven Wirkungshöhe > 1 m betroffen waren. Die am weitesten vom Kegelhalbs entfernt liegenden Wohngebäude (5, 6, 7, 8, 15, 17, 18, 19) weisen hingegen alle eine effektive Wirkungshöhe < 1 m auf. Es scheint also ein gewisser Trend zur Abnahme der effektiven Wirkungshöhe vom Kegelhalbs zu weiter entfernt liegenden Bereichen zu geben.



Abbildung 53: Räumliche Verteilung der Gebäude auf welche effektive Wirkungshöhen < 1 m und > 1 m gewirkt haben.

In Abbildung 54 sind Gebäude an welchen zeitgleich zur effektiven Wirkungshöhe eine maximale Fließgeschwindigkeit > 1 m/s beziehungsweise < 1 m/s gewirkt hat markiert. Vor allem die Gebäude Nr. 9, 14, 15, 17, 18 und 19 im südlichen Bereich des Schwemmkegels waren von Fließgeschwindigkeiten < 1 m/s betroffen. Hier kann von einem eher statischen Charakter der Überschwemmung ausgegangen werden. Die Gebäude im, an den Kegel Hals angrenzenden Bereich, waren mit Ausnahme von Gebäude Nr. 13, welches in der Simulation nicht vom Ereignis erreicht wurde, alle von Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s betroffen.



Abbildung 54: Räumliche Verteilung der Wohngebäude welche durch eine Fließgeschwindigkeit > 1 m/s und < 1 m/s betroffen waren.

6.1.2 Intensitätswerte für das Intensitätskriterium $v \cdot h$

Für das Intensitätskriterium dynamischer Überschwemmungen nach Empfehlungen des Bundes (Loat und Petrascheck, 1997) wurden die zeitgleich über das Ereignis maximalen Fliesstiefen und -geschwindigkeiten für jedes der 20 Wohngebäude an der angeströmten Wand aus den aufgezeichneten Daten extrahiert. Durch Multiplikation dieser Fliesstiefen und -geschwindigkeiten ist schliesslich das Intensitätskriterium $v \cdot h$ generiert worden. Nachfolgend eine Übersicht über die verwendeten Intensitätsdaten. Die maximale Fliesstiefe und -geschwindigkeit wird dabei am Gebäude Nr. 2 im obersten Dorfteil in der Nähe des Kegelhalses erreicht. In den Daten in Tabelle 17 zeigt sich, dass die Fliesstiefe im Gegensatz zur Fliessgeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung vom Kegelhals tendenziell abnimmt. So werden die grössten Fliesstiefen bei den Gebäuden Nr. 1, 2, 4 und 16 in der Nähe des Kegelhalses erreicht.

Tabelle 17: Verwendete Fliesstiefen und -geschwindigkeiten zur Berechnung des Intensitätskriteriums $v \cdot h$.

Nr.	v [m/s]	h [m]	$v \cdot h$ [m ² /s]
1	1.59	1.29	2.05
2	3.40	1.72	5.86
3	1.27	0.36	0.45
4	0.76	0.95	0.72
5	1.54	0.68	1.04
6	1.41	0.59	0.84
7	1.54	0.51	0.79
8	0.19	0.22	0.04
9	0.95	0.24	0.23
10	0.55	0.44	0.24
11	0.63	0.40	0.25
12	1.59	0.20	0.32
13	-	-	-
14	1.05	0.54	0.57
15	0.41	0.32	0.13
16	2.57	1.15	2.94
17	0.18	0.63	0.11
18	0.86	0.35	0.30
19	0.52	0.41	0.21
20	0.58	0.23	0.13

Wie in Abbildung 55 gezeigt, kommt es beim Intensitätskriterium $v \cdot h$ im Bereich des Kegelhalses zu einer Häufung von $v \cdot h$ -Werten $> 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$. 4 der insgesamt 5 betroffenen Gebäude weisen dort einen $v \cdot h$ -Wert von $> 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ auf. Einzig auf Gebäude Nr. 3 wirkten in der Nähe des Kegelhalses $v \cdot h$ -Werte $< 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ ein, welche durch eine vergleichsweise geringe Fliesstiefe erklärt werden können. Produkte aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit $< 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ konzentrieren sich hauptsächlich in einem Band in der Mitte des Schwemmkegels bei den Gebäuden Nr. 9, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19 und 20. Eine Tendenz zur Abnahme der $v \cdot h$ -Werte mit zunehmendem Abstand vom Kegelhals ist im Gegensatz zum Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe (vergleiche Abbildung 53) keine auszumachen.



Abbildung 55: Räumliche Verteilung der Wohngebäude welche durch einen $v \cdot h$ -Wert $< 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ und $> 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ betroffen waren.

6.2 Zuordnung zur Intensitätsklasse

Basierend auf den im vorangehenden Kapitel 6.1 behandelten Ergebnissen der Prozessintensitäten werden in diesem Kapitel die Zuordnungen der 20 untersuchten Gebäude zu einer der drei Intensitätsklassen für das schadenbasierte Klassierungssystem und das Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) dargelegt.

6.2.1 Zuordnung der Gebäude zu einer Intensitätsklasse auf Grundlage des neu entwickelten, auf effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Klassierungssystems

Aufgrund der in Kapitel 5.4.2 dargestellten Zuordnungskriterien und Klassengrenzen konnten die 20 untersuchten Wohngebäude jeweils einer Intensitätsklasse zugeordnet werden (siehe Tabelle 18). Insgesamt sind 14 Wohngebäude mit der Intensitätsklasse schwach klassiert worden. 6 Wohngebäude wurden der mittleren Intensitätsklasse zugeordnet. Bei Gebäude Nr. 10 erfolgte die Zuweisung zur schwachen Intensitätsklasse aufgrund der Fließgeschwindigkeit, welche mit 0.42 m/s deutlich geringer war, als für die mittlere Intensitätsklasse gefordert. Wohngebäude, welche einer starken Intensität ausgesetzt waren gab es in Baltschieder keine. Da Gebäude Nr. 13 in der Simulation nicht durch die Einwirkung der Überschwemmung betroffen war, konnte aufgrund der dadurch fehlenden Intensitätswerte keine Zuordnung zu einer Intensitätsklasse gemacht werden.

Tabelle 18: Intensitätsklassen und –kriterien für alle 20 untersuchten Wohngebäude.

Nr.	effektive Wirkungshöhe [m]	Fließgeschwindigkeit [m/s]	Intensitätsklasse
1	3.10	1.29	mittel
2	2.14	2.07	mittel
3	2.77	1.08	mittel
4	1.05	1.34	mittel
5	0.70	1.43	schwach
6	0.63	1.34	schwach
7	0.57	1.15	schwach
8	0.51	0.08	schwach
9	0.41	0.24	schwach
10	1.10	0.42	schwach
11	0.65	0.34	schwach
12	0.78	1.09	schwach
13	-	-	-
14	0.63	0.70	schwach
15	0.33	0.36	schwach
16	3.61	1.17	mittel
17	0.71	0.15	schwach
18	0.86	0.83	schwach
19	0.44	0.40	schwach
20	0.41	0.21	schwach

6.2.2 Zuordnung zu einer Intensitätsklasse auf Grundlage des Intensitätskriteriums $v \cdot h$

Die Zuordnung zur Intensitätsklasse erfolgte auf Grundlage der Produkte aus Fliesstiefe und -geschwindigkeit für jedes Wohngebäude. Gemäss den Empfehlungen des Bundes (Loat und Petraschek, 1997) erfolgte die Zuordnung jeweils gemäss der in Tabelle 1 aufgeführten Klassengrenzen. Für Gebäude Nr. 13 konnte wiederum aufgrund fehlender Intensitätswerte keine Klassierung vorgenommen werden.

Insgesamt konnten so 11 Gebäude der schwachen, 6 Gebäude der mittleren und 3 Gebäude der starken Intensitätsklasse zugeordnet werden (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Übersicht über die v^*h – Werte und die jeweilige nach Loat und Petraschek (1997) zugeordnete Intensitätsklasse für alle untersuchten Wohngebäude in Baltschieder.

Nr.	v^*h	Intensitätsklasse
1	2.05	stark
2	5.86	stark
3	0.45	schwach
4	0.72	mittel
5	1.04	mittel
6	0.84	mittel
7	0.79	mittel
8	0.04	schwach
9	0.23	schwach
10	0.24	schwach
11	0.25	schwach
12	0.32	schwach
13	-	-
14	0.57	mittel
15	0.13	schwach
16	2.94	stark
17	0.11	schwach
18	0.30	schwach
19	0.21	schwach
20	0.13	schwach

6.3 Schadenempfindlichkeit der Wohngebäude in Baltschieder

In nachfolgenden Tabelle 20 findet sich eine Auflistung der bestimmten Schadenempfindlichkeiten der in dieser Arbeit untersuchten Wohngebäude. Die Nummerierungen beziehen sich jeweils auf die in Abbildung 49 dargestellten Gebäude. Auffallend ist vor allem Gebäude Nr. 13, das trotz nicht nachgewiesener, physikalischer Einwirkung der Überschwemmung einen Schadenempfindlichkeitswert aufweist. Insgesamt zeigten dabei 6 Wohngebäude eine Schadenempfindlichkeit von 0.00. Bei den restlichen 14 Wohngebäuden trat eine Schadenempfindlichkeit > 0.00 auf. Der Maximalwert der Schadenempfindlichkeit ist von Gebäude Nr. 1 am Kegelhals erreicht worden. Mit Ausnahme von Gebäude Nr. 16 haben alle 5 anderen Wohngebäude mit Minimalwerten der Schadenempfindlichkeit von 0.00 einen relativ grossen Abstand vom Kegelhals.

Tabelle 20: Übersicht über die Schadenempfindlichkeit für alle der 20 untersuchten Wohngebäude in Baltschieder.

Nr.	Schadenempfindlichkeit	Nr.	Schadenempfindlichkeit
1	0.71	11	0.04
2	0.58	12	0.02
3	0.53	13	0.02
4	0.34	14	0.01
5	0.25	15	0.00
6	0.23	16	0.00
7	0.13	17	0.00
8	0.12	18	0.00
9	0.10	19	0.00
10	0.10	20	0.00

In Abbildung 56 ist die räumliche Lage der betroffenen Gebäude innerhalb eines entsprechenden Schadenempfindlichkeitsbereiches dargestellt. Wohngebäude mit einer Schadenempfindlichkeit > 0.25 befinden sich alle in der Nähe des Kegelhalses. Zwei Wohngebäude (Nr. 13 und Nr. 16) haben in diesem Bereich eine sehr geringe Schadenempfindlichkeit von 0.00 - 0.10. Die Schadenempfindlichkeitsklasse 0.00 - 0.10 dominiert den daran angrenzenden Bereich des Dorfes. Im bebauten Bereich mit dem grössten Abstand zum Kegelhals weisen alle untersuchten Wohngebäude eine Schadenempfindlichkeit von 0.11 - 0.25 auf.



Abbildung 56: Räumliche Verteilung der Schadenempfindlichkeit bei den betroffenen Wohngebäuden in Baltschieder.

6.4 Physische Vulnerabilität der Wohngebäude in Baltschieder

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden zunächst in 6.4.1 die Resultate der physischen Vulnerabilität der Wohngebäude aufgrund des neu entwickelten schadenbasierten Klassierungssystems dargestellt. Anschliessend folgen in 6.4.2 die Resultate der physischen Vulnerabilität, welche mit dem Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) hergeleitet wurden.

6.4.1 Physische Vulnerabilität auf Grundlage des schadenbasierten Klassierungssystems

In der Tabelle 21 werden jeweils die auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Intensitätsklassen und Schadenempfindlichkeiten für die 20 untersuchten Wohngebäude angegeben. Die Wohngebäude sind dabei absteigend entsprechend ihrer Schadenempfindlichkeit von hoch zu niedrig geordnet.

Die Wohngebäude mit den 4 grössten Schadenempfindlichkeiten weisen allesamt eine mittlere Intensität auf. Mit Ausnahme von Gebäude Nr. 16 gehören alle Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit 0.00 der schwachen Intensitätsklasse an. Für Wohngebäude Nr. 13 konnte aufgrund der fehlenden Prozesseinwirkung keine Zuordnung der Schadenempfindlichkeit zu einer Intensitätsklasse gemacht werden, was gleichzeitig auch die Bestimmung eines Wertes für die physische Vulnerabilität verunmöglicht.

Tabelle 21: Intensitätsklassen und korrespondierende Schadenempfindlichkeit für alle 20 untersuchten Gebäude.

Nr.	Intensitätsklasse	Schadenempfindlichkeit
1	mittel	0.71
2	mittel	0.58
3	mittel	0.53
4	mittel	0.34
5	schwach	0.25
6	schwach	0.23
7	schwach	0.13
8	schwach	0.12
9	schwach	0.10
10	schwach	0.10
11	schwach	0.04
12	schwach	0.02
13	-	0.02
14	schwach	0.01
15	schwach	0.00
16	mittel	0.00
17	schwach	0.00
18	schwach	0.00
19	schwach	0.00
20	schwach	0.00

Mit Blick auf das unten stehende Histogramm (Abbildung 57) wird ebenfalls ersichtlich, dass sich die untersuchten Wohngebäude mit einer geringen Schadenempfindlichkeit in Bereichen mit schwacher Intensität konzentrieren. So weisen alle 15 Wohngebäude, welche der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet werden konnten, eine relativ geringe Schadenempfindlichkeit zwischen 0.00 und maximal 0.25 auf. Im Gegensatz dazu haben Wohngebäude welche einer mittleren Intensität ausgesetzt waren, zum Teil deutlich höhere Schadenempfindlichkeiten vorzuweisen. 3 der 5 Wohngebäude mit mittlerer Intensität weisen eine Schadenempfindlichkeit innerhalb der Klasse von 0.51 – 1.00 auf. Einzig 1 Wohngebäude, welches der mittleren Intensität zugeordnet wurde, hat eine geringe Schadenempfindlichkeit von 0.00 – 0.10. Der in Abbildung 59 dargestellte Trend zur Zunahme der Schadenempfindlichkeit mit zunehmender Intensität zeichnet sich somit auch in der unten stehenden Abbildung ab.

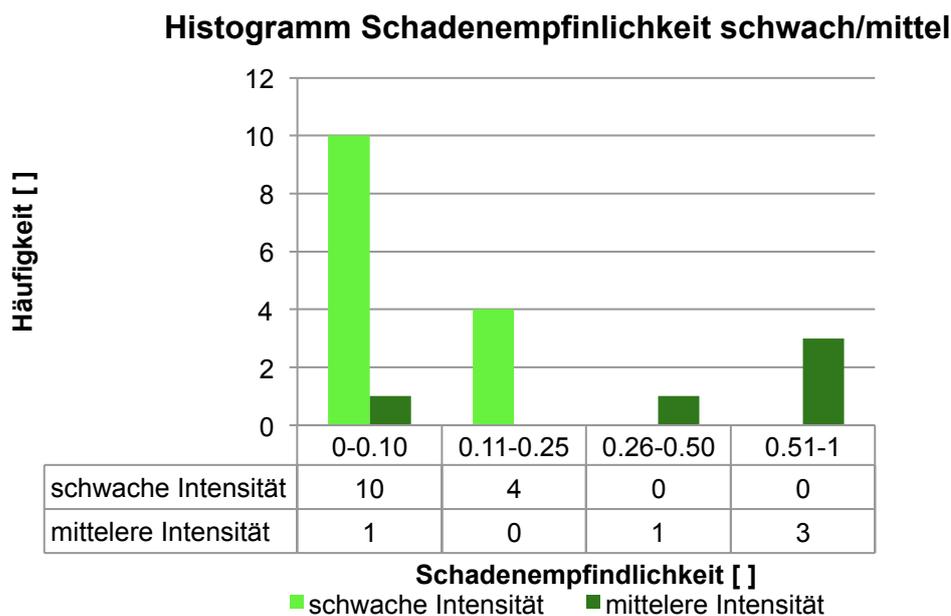


Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeit in den Intensitätsklassen schwach und mittel des Intensitätskriteriums mit effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit.

In Tabelle 22 sind nachfolgend diverse statistische Masszahlen, welche die physische Vulnerabilität beschreiben, zusammengefasst. Es wird ersichtlich, dass sowohl der Mittelwert als auch der Median der Schadenempfindlichkeit in der schwachen Intensitätsklasse mit 0.07 respektive 0.03 deutlich geringer ist als in der mittleren Intensitätsklasse, in welcher der Mittelwert 0.43 und der Median 0.53 beträgt. Ein Trend zu ansteigender Schadenempfindlichkeit mit zunehmender Intensitätsklasse ist zu beobachten. Mit Blick auf das Streuungsmass des Interquartilsabstandes zeigt sich, dass die Schadenempfindlichkeit in der mittleren Intensitätsklasse doppelt so stark streut, wie in der schwachen Intensitätsklasse. Diese Beobachtung ist auch graphisch in Abbildung 58 ersichtlich. Mit zunehmender Intensität scheinen also sowohl die Streuung als auch Median und Mittelwert zuzunehmen. Es bleibt beim Streuverhalten jedoch zu beachten, dass vor allem bei der mittleren Intensitätsklasse nur wenige Daten vorliegen.

Tabelle 22: Diverse Statistische Masszahlen für die auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit beruhenden Intensitätsklassen.

	Mittelwert	Median	Maximum	Minimum	Spannweite	Q ₂₅	Q ₇₅	Quartilsabstand
schwach	0.07	0.03	0.25	0.00	0.25	0.00	0.12	0.12
mittel	0.43	0.53	0.71	0.00	0.71	0.34	0.58	0.24
stark	-	-	-	-	-	-	-	-

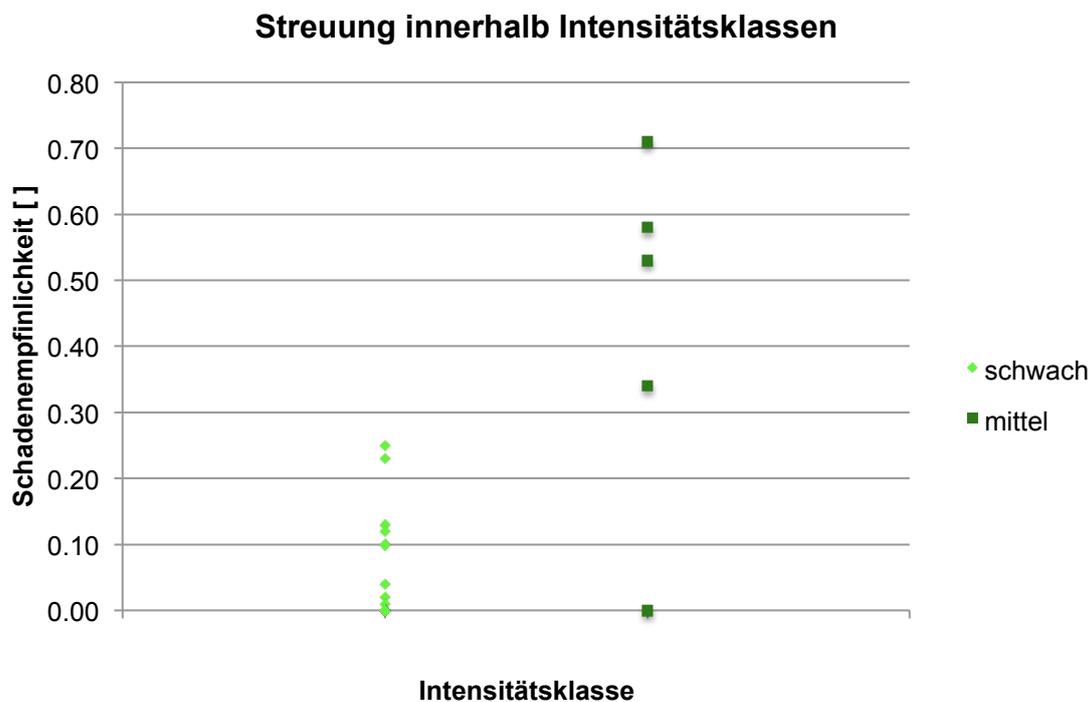


Abbildung 58: Streuung der Schadenempfindlichkeiten innerhalb der auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit beruhenden Intensitätsklassen.

In den nachfolgenden Boxplots in Abbildung 59 sind die statistischen Masszahlen von Tabelle 22 graphisch für die beiden Intensitätsklassen schwach und mittel dargestellt. Zwischen den beiden Intensitätsklassen fällt der relativ grosse Unterschied des Medians auf. Die Intensitätsklasse schwach zeigt wie bereits erwähnt mit 0.02 einen deutlich geringeren Medianwert für die Schadenempfindlichkeit als die Intensitätsklasse mittel mit 0.53.

Schadenempfindlichkeits-Boxplots

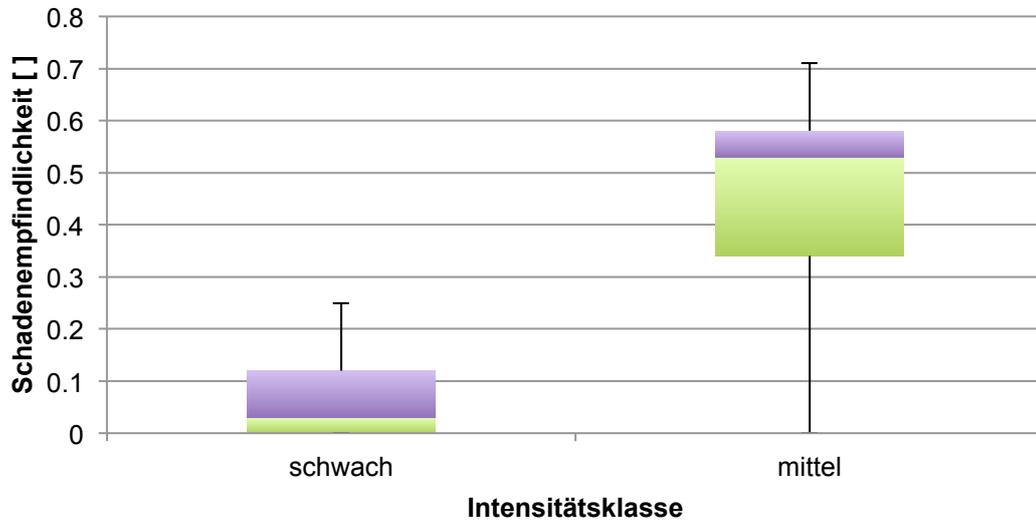


Abbildung 59: Boxplots der Schadenempfindlichkeit für die auf Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Intensitätsklassen mit Median, 0.25-, 0.75-Quartil und Whisker.

Das unten in Abbildung 60 dargestellte Diagramm Schadenempfindlichkeit vs. effektive Wirkungshöhe zeigt tendenziell eine Zunahme der Schadenempfindlichkeit mit steigender effektiver Wirkungshöhe. Zwischen 0.50 m und 1 m effektiver Wirkungshöhe streuen die Daten gut sichtbar. Auf diese Streuung wird in der Diskussion näher eingegangen. Für effektive Wirkungshöhen < 0.50 m oder > 1 m kann aufgrund der geringen Datenmenge keine Aussage über das Streuverhalten gemacht werden.

Schadenempfindlichkeit vs effektive Wirkungshöhe

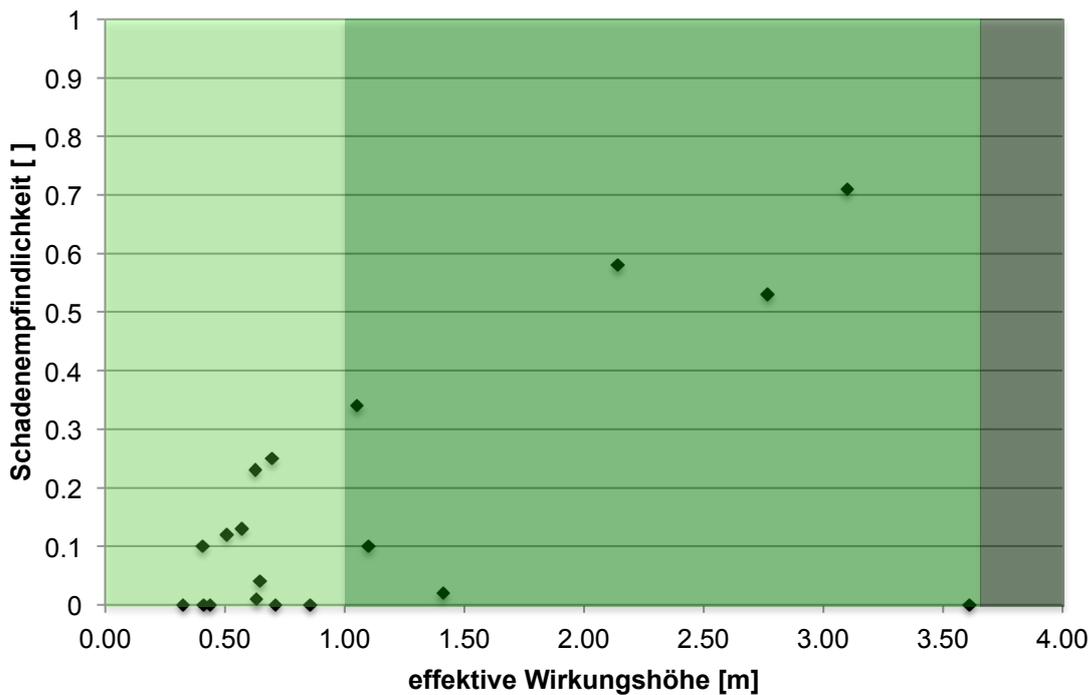


Abbildung 60: Diagramm der effektive Wirkungshöhe vs. Schadenempfindlichkeit mit sichtlicher Streuung der Datenpunkte zwischen 0.50 m und 1 m.

6.4.2 Physische Vulnerabilität auf Grundlage des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997)

In der Tabelle 23 wurde die Zuordnung in die Intensitätsklassen nach Empfehlungen des Bundes (Loat und Petraschek, 1997) vorgenommen. Den in Tabelle 1 definierten Intensitätsklassen schwach, mittel und stark sind die entsprechenden Schadenempfindlichkeiten aller 20 untersuchten Wohngebäude gegenübergestellt. Die Nummerierung bezieht sich auf die in Abbildung 49 dargestellten untersuchten Wohngebäude.

Die Wohngebäude mit den 4 grössten Schadenempfindlichkeiten können in zwei Fällen der starken, in einem Fall der mittleren und in einem Fall gar der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet werden. Wohngebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 werden in 5 von 6 Fällen der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet. Einzig das Wohngebäude Nr. 16 mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 gehört der Klasse der starken Intensität an und stellt damit in dieser Klasse einen Ausreisser dar. Für Wohngebäude Nr. 13 konnte aufgrund der fehlenden Prozesseinwirkung erneut keine Zuordnung zu einer Intensitätsklasse gemacht werden, wodurch auch keine physische Vulnerabilität hergeleitet werden konnte.

Tabelle 23: Intensitätsklasse mit korrespondierender Schadenempfindlichkeit aller 20 untersuchten Wohngebäude für das Intensitätskriterium v^*h .

Nr.	Intensitätsklasse	Schadenempfindlichkeit
1	stark	0.71
2	stark	0.58
3	schwach	0.53
4	mittel	0.34
5	mittel	0.25
6	mittel	0.23
7	mittel	0.13
8	schwach	0.12
9	schwach	0.10
10	schwach	0.10
11	schwach	0.04
12	schwach	0.02
13	-	-
14	mittel	0.01
15	schwach	0.00
16	stark	0.00
17	schwach	0.00
18	schwach	0.00
19	schwach	0.00
20	schwach	0.00

Bei der in Abbildung 61 illustrierten Häufigkeitsverteilung je Schadenempfindlichkeitsklasse und Intensität zeigt sich ebenfalls, dass der Grossteil der Wohngebäude, welche von schwacher Intensität betroffen waren, eine geringe Schadenempfindlichkeit von 0.00-0.10 aufweist. Nur zwei Gebäude der schwachen Intensitätsklasse haben höhere Schadenempfindlichkeiten, wobei das Wohngebäude Nr. 3 mit einer Schadenempfindlichkeit zwischen 0.51 und 1.00 als Ausreisser zu taxieren ist. Die 5

Wohngebäude, bei denen eine mittlere Intensität nachgewiesen wurde, weisen Schadenempfindlichkeiten zwischen 0.00 und 0.50 auf. Dabei konzentrieren sich 3 der 5 Gebäude mit mittlerer Intensität auf die Schadenempfindlichkeitsklasse 0.11-0.25. Die Wohngebäude, welche einer starken Intensität ausgesetzt waren, kommen vor allem in der Klasse mit der höchsten Schadenempfindlichkeit von 0.51-1.00 vor.

**Histogramm Schadenempfindlichkeit schwach/mittel/
stark**

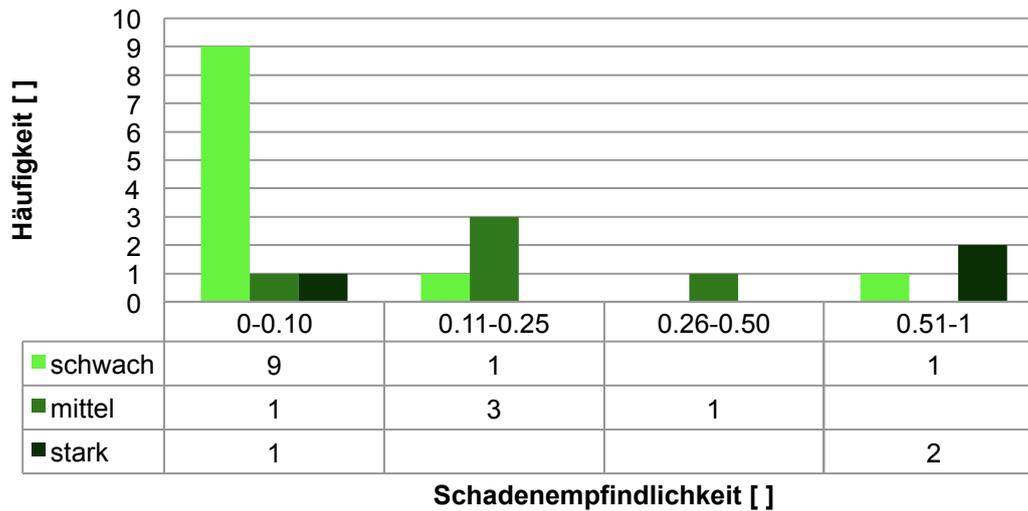


Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten auf die einzelnen Intensitätsklassen basierend auf dem Intensitätskriterium $v \cdot h$.

In der folgenden Übersichtstabelle (Tabelle 24) sind die statistischen Masszahlen der Schadenempfindlichkeit für jede auf dem Intensitätskriterium $v \cdot h$ basierende Intensitätsklasse aufgeführt. Wie an den Medianwerten der Schadenempfindlichkeit für jede Klasse von 0.02, 0.23 und 0.58 ersichtlich, nimmt die Schadenempfindlichkeit mit ansteigender Intensitätsklasse von schwach zu stark zu. Einhergehend mit der Zunahme der Intensität und Schadenempfindlichkeit nimmt ebenfalls die Streuung der Schadenempfindlichkeit zu. Dies wird durch die Zahlenwerte des Quartilsabstand und Abbildung 62 verdeutlicht: Bereits in der mittleren Intensitätsklasse ist die Streuung der Schadenempfindlichkeit doppelt so gross wie bei der schwachen Intensitätsklasse. Im Fall der starken Intensitätsklasse streuen die Schadenempfindlichkeitsdaten sogar mehr als drei Mal so stark wie bei der schwachen Intensitätsklasse. Das Streuverhalten ist vor allem in der starken Intensitätsklasse aufgrund des geringen Stichprobenumfangs jedoch nur bedingt aussagekräftig. In Abbildung 62 ist der Schadenempfindlichkeitswert 0.53 von Gebäude Nr. 3 in der schwachen Intensitätsklasse deutlich erkennbar und stellt vermutlich einen Ausreisser dar.

Tabelle 24: Statistische Masszahlen für jede der 3 auf $v \cdot h$ basierenden Intensitätsklassen.

	Mittelwert	Median	Maximum	Minimum	Spannweite	Q ₂₅	Q ₇₅	Quartilsabstand
schwach	0.08	0.02	0.53	0.00	0.53	0.00	0.10	0.10
mittel	0.19	0.23	0.34	0.01	0.33	0.13	0.25	0.12
stark	0.43	0.58	0.71	0.00	0.71	0.29	0.65	0.36

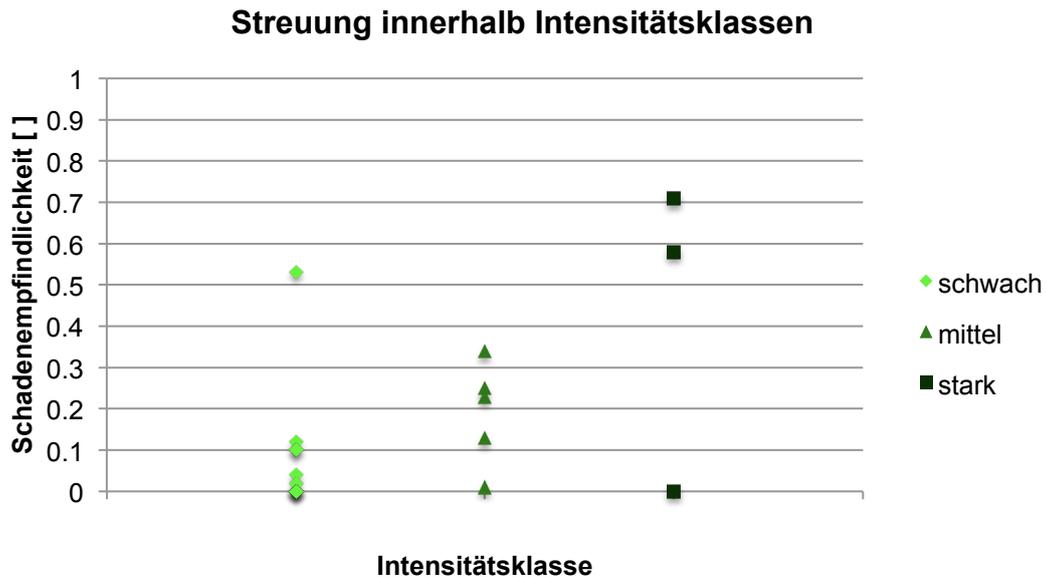


Abbildung 62: Streuung der Schadenempfindlichkeit innerhalb der drei Intensitätsklassen schwach, mittel und stark nach Loat und Petraschek (1997).

Die tabellarisch in Tabelle 24 dargestellten statistischen Masszahlen sind im nachfolgenden Boxplot in Abbildung 63 graphisch für jede der auf $v \cdot h$ basierenden Intensitätsklassen schwach, mittel und stark dargestellt. Der lange positive Whisker in der Intensitätsklasse schwach ergibt sich durch den Schadenempfindlichkeitswert von 0.53 des Gebäudes Nr. 3 und fällt besonders auf. Weiter ist der bereits besprochene schrittweise Anstieg des Medians von der Intensitätsklasse schwach zu stark und die Zunahme des Interquartilsabstands klar ersichtlich. Letztere ist jedoch aufgrund der geringen Datenmenge im Intensitätsbereich von $> 1 \text{ m}^2/\text{s}$ zu relativieren.

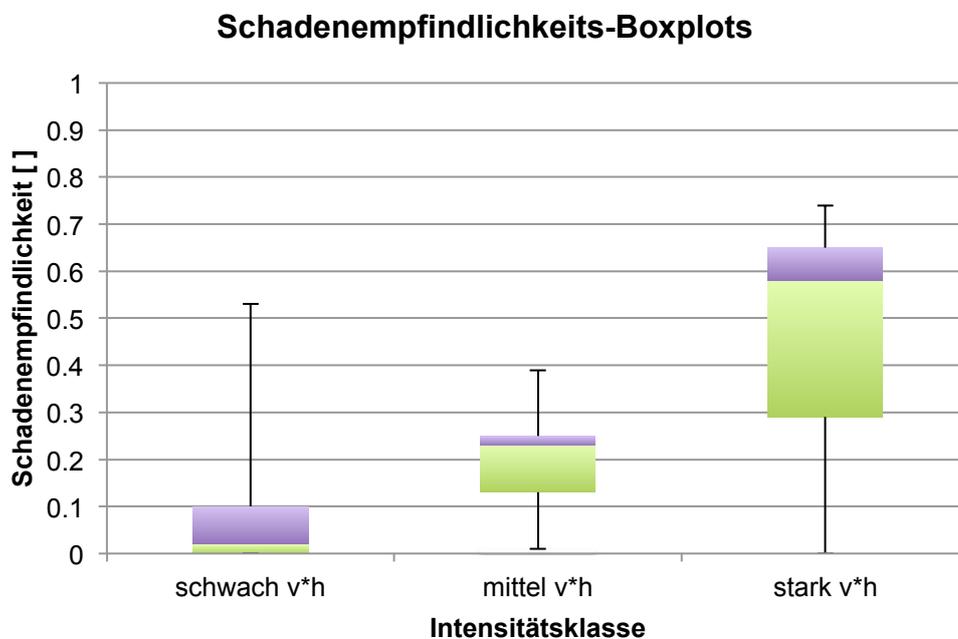


Abbildung 63: Boxplotdarstellung der statistischen Masszahlen der drei Intensitätsklassen schwach, mittel und stark mit Median, 0.25-, 0.75-Quartil und Whisker.

Im folgenden Diagramm in Abbildung 64 ist die Schadenempfindlichkeit den unklassierten Produkten aus Fliessteife und -geschwindigkeit ($v \cdot h$) gegenübergestellt. Bis auf drei Datenpunkte liegen alle Daten im Bereich mit $v \cdot h$ -Werten $< 1 \text{ m}^2/\text{s}$. Zwischen $0.00 \text{ m}^2/\text{s}$ und $0.50 \text{ m}^2/\text{s}$ scheint die Streuung der Schadenempfindlichkeit relativ gering zu sein. Über das Streuverhalten der Schadenempfindlichkeiten bei grösseren Intensitäten kann wegen der geringen Datenmenge keine Aussage gemacht werden. Ein eindeutiger Trend für eine Zunahme der Schadenempfindlichkeit mit Zunahme der $v \cdot h$ -Werte ist in den Daten nicht auszumachen.

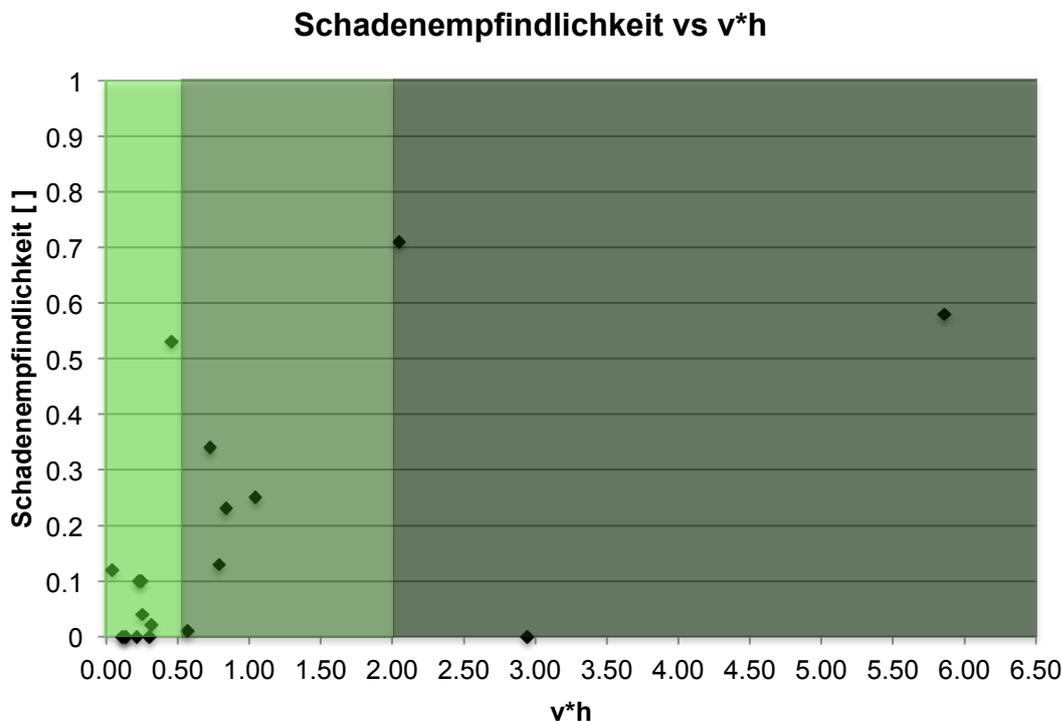


Abbildung 64: Diagramm $v \cdot h$ vs. Schadenempfindlichkeit mit geringer Streuung der Datenpunkte zwischen $0.00 \text{ m}^2/\text{s}$ und $0.50 \text{ m}^2/\text{s}$. Die Intensitätsklassen nach Loat und Petraschek (1997) sind in hellgrün (schwach), mittelgrün (mittel) und dunkelgrün (stark) markiert.

6.5 Vergleich der physischen Vulnerabilität des schadenbasierten Klassierungssystems und des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997)

In der unten stehenden Tabelle 25 sind die Zuordnungen zu den Intensitätsklassen mit dem Kriterium $v \cdot h$ und dem neu entwickelten auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Kriterium einander gegenübergestellt. Die gemäss Abbildung 49 durchnummerierten Gebäude sind entsprechend ihrer Schadenempfindlichkeit absteigend aufgelistet.

In den 11 grün umrandeten Gebäuden von Tabelle 25 kommt man bei beiden Kriterien zur gleichen Intensitätsklasse. Übereinstimmungen gibt es vor allem in der schwachen Intensitätsklasse und geringen Schadenempfindlichkeiten bei effektiven Wirkungshöhen $< 1 \text{ m}$ beziehungsweise $v \cdot h$ -Werten $< 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$. Eine Ausnahme bildet dabei Gebäude Nr. 3, welches nach Kriterien des Bundes ($v \cdot h$) einer schwachen Intensität zugeordnet wurde und bei der effektiven Wirkungshöhe einer mittleren Intensität. Die grössten Unterschiede bezüglich der Klassierung gibt es in der mittleren und starken Intensitätsklasse. So sind der $v \cdot h$ -Klasse mittel zugeordnete Gebäude beim Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit meist als von schwacher Intensität betroffen klassiert worden. Die $v \cdot h$ -Klasse stark entspricht schliesslich beim Kriterium effektive Wirkungshöhe vollumfänglich der Klasse mittel.

Insgesamt ist die Zuordnung zu den Intensitätsklassen vor allem im oberen Bereich der Schadenempfindlichkeit beim Kriterium v^*h heterogener als beim Kriterium der effektiven Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit. So kommen für die 4 Gebäude mit den höchsten Schadenempfindlichkeiten von schwach bis stark alle Intensitätsklassen vor, während dem diese Gebäude in der auf Schaden basierenden Intensitätsklasse alle der mittleren Intensität zugeordnet werden.

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Intensitätsklassen der beiden Klassierungssystemen mit unterschiedlichen Intensitätskriterien. Übereinstimmende Klassenzuordnungen sind in grün umrandet.

Nr.	Schadenempfindlichkeit	v^*h [m ² /s]	effektive Wirkungshöhe [m]	v^*h - Klasse	effektive Wirkungshöhe/v Klasse
1	0.71	2.05	3.10	stark	mittel
2	0.58	5.86	2.14	stark	mittel
3	0.53	0.45	2.77	schwach	mittel
4	0.34	0.72	1.05	mittel	mittel
5	0.25	1.04	0.70	mittel	schwach
6	0.23	0.84	0.63	mittel	schwach
7	0.13	0.79	0.57	mittel	schwach
8	0.12	0.04	0.51	schwach	schwach
9	0.1	0.23	0.41	schwach	schwach
10	0.1	0.24	1.10*	schwach	schwach
11	0.04	0.25	0.65	schwach	schwach
12	0.02	0.88	0.88	schwach	schwach
13	-	-	-	-	-
14	0.01	0.57	0.63	mittel	schwach
15	0	0.13	0.33	schwach	schwach
16	0	2.94	3.61	stark	mittel
17	0	0.11	0.71	schwach	schwach
18	0	0.30	0.86	schwach	schwach
19	0	0.21	0.44	schwach	schwach
20	0	0.13	-0.10	schwach	schwach

Beim Vergleich der Verteilung der Schadenempfindlichkeiten innerhalb der schwachen Intensitätsklasse beider Klassierungssysteme in Abbildung 65 zeigt sich, dass bei beiden Intensitätskriterien der weitaus grösste Teil der Gebäude in der schwachen Intensität eine geringe Schadenempfindlichkeit zwischen 0.00 und 0.25 aufweist. Wie bereits erwähnt, hat bei der auf v^*h basierenden Klassierung innerhalb der Klasse der schwachen Intensität einzig das Gebäude Nr. 3 eine relativ hohe Schadenempfindlichkeit von 0.53. In der auf effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Intensitätsklasse sind indes keine derartigen Ausreisser zu beobachten.

Histogrammvergleich schwache Intensität

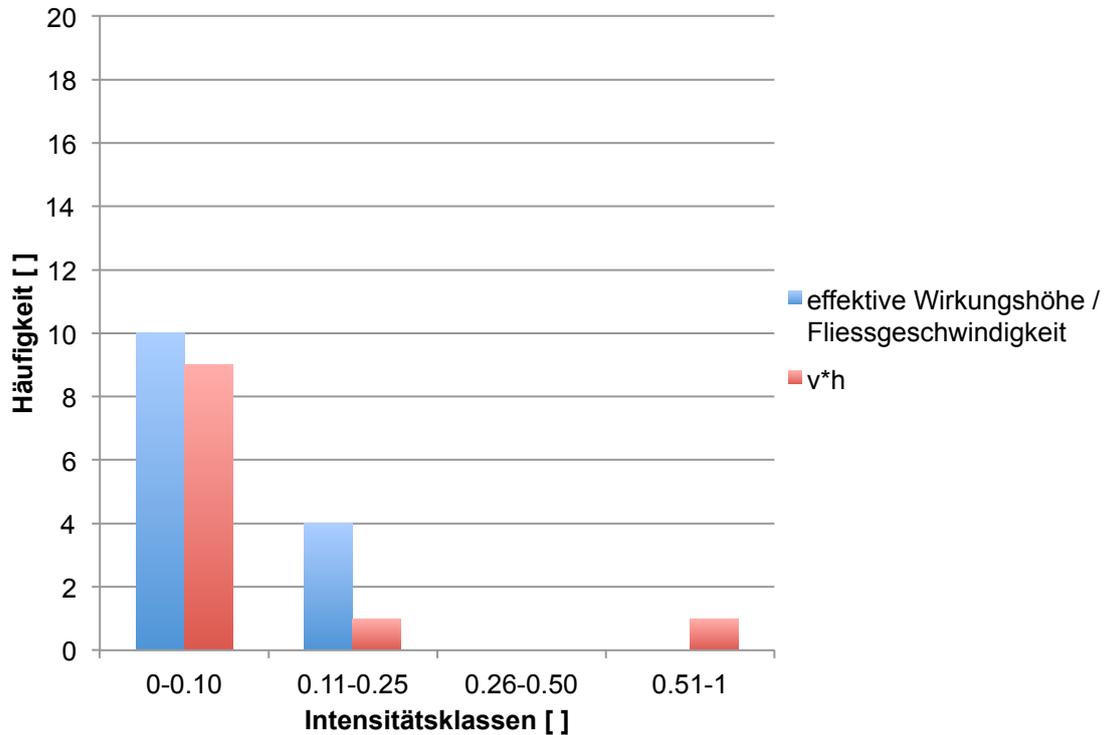


Abbildung 65: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten zwischen der Intensitätsklasse schwach der beiden Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit und $v \cdot h$.

Mit Blick auf die Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten innerhalb der beiden mittleren Intensitätsklassen in Abbildung 66 wird ein Unterschied zwischen den beiden Klassierungssystemen deutlich: Während bei der mittleren Intensitätsklasse des $v \cdot h$ -Kriteriums der Hauptteil der Gebäude eine Schadenempfindlichkeit zwischen 0.11 und 0.25 aufweist, kommt es beim auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Kriterium zu einer Häufung bei einer Schadenempfindlichkeit zwischen 0.51 und 1. Dieser Umstand führt zu einem vergleichsweise deutlich höheren Medianwert des auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Klassierungssystems (schadenbasiertes Klassierungssystem) in der mittleren Intensitätsklasse.

Histogrammvergleich mittlere Intensität

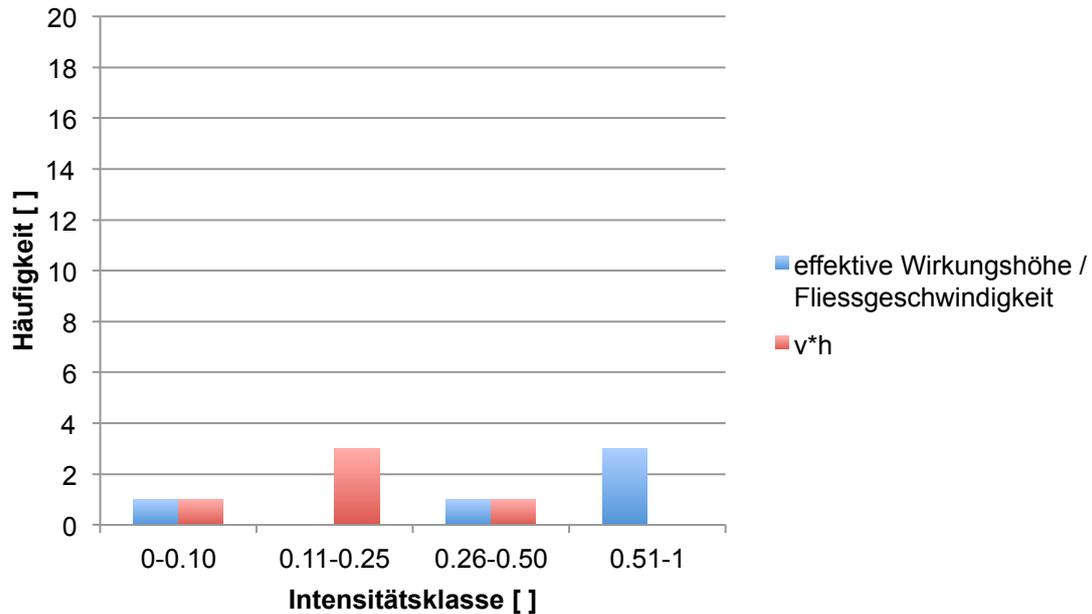


Abbildung 66: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Schadenempfindlichkeiten zwischen der Intensitätsklasse mittel der beiden Intensitätskriterien effektive Wirkungshöhe/Fließgeschwindigkeit und $v \cdot h$.

Beim Vergleich der Boxplots in Abbildung 67 und der in Tabelle 22 und 24 aufgeführten statistischen Masszahlen der beiden Arten der Intensitätsklassierung zeigt sich, dass die Mediane für die schwache Intensitätsklasse mit einem Median von 0.02 beziehungsweise 0.03 praktisch identisch sind. Auch das 25%-Quartil von 0.00 und das 75%-Quartil von 0.10 stimmen überein. Einziger Unterschied bei der schwachen Intensitätsklasse ist der obere Whisker, welcher beim Kriterium $v \cdot h$ stärker ausgeprägt ist. Grund dafür ist die Zuteilung von Gebäude Nr. 3 mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.53 zur schwachen Intensitätsklasse beim Kriterium $v \cdot h$.

Die grössten Unterschiede ergeben sich zwischen den beiden mittleren Intensitätsklassen. Während dem der Median der Schadenempfindlichkeit beim Intensitätskriterium $v \cdot h$ hier bei 0.18 liegt, ist er beim neu entwickelten Intensitätskriterium mit 0.53 fast 3 mal höher und entspricht in etwa der Schadenempfindlichkeit der starken Intensitätsklasse des Klassierungssystems nach Loat und Petraschek (1997). Der Quartilsabstand ist vergleichbar, wohingegen die neu entwickelte Intensitätsklasse eine grössere Spannweite mit 0.71 aufweist. Diese relativ grosse Spannweite ist auf das Gebäude Nr. 16 zurückzuführen, welches eine Schadenempfindlichkeit von 0.00 aufweist.

Bezüglich des Medians der Schadenempfindlichkeit entspricht die mittlere Intensitätsklasse des auf effektiver Wirkungshöhe und Fließgeschwindigkeit basierenden Intensitätskriteriums (0.53) in etwa der starken $v \cdot h$ -Intensitätsklasse mit einem Schadenempfindlichkeits-Median von 0.58. Beim Kriterium $v \cdot h$ ist die Streuung aber vergleichsweise grösser, was sich in einem höheren Interquartilsabstand von 0.36 zeigt. Allgemein ist in beiden Klassierungssystemen ein Trend zur Zunahme der Medianwerte mit ansteigender Intensität in den Boxplots auszumachen.

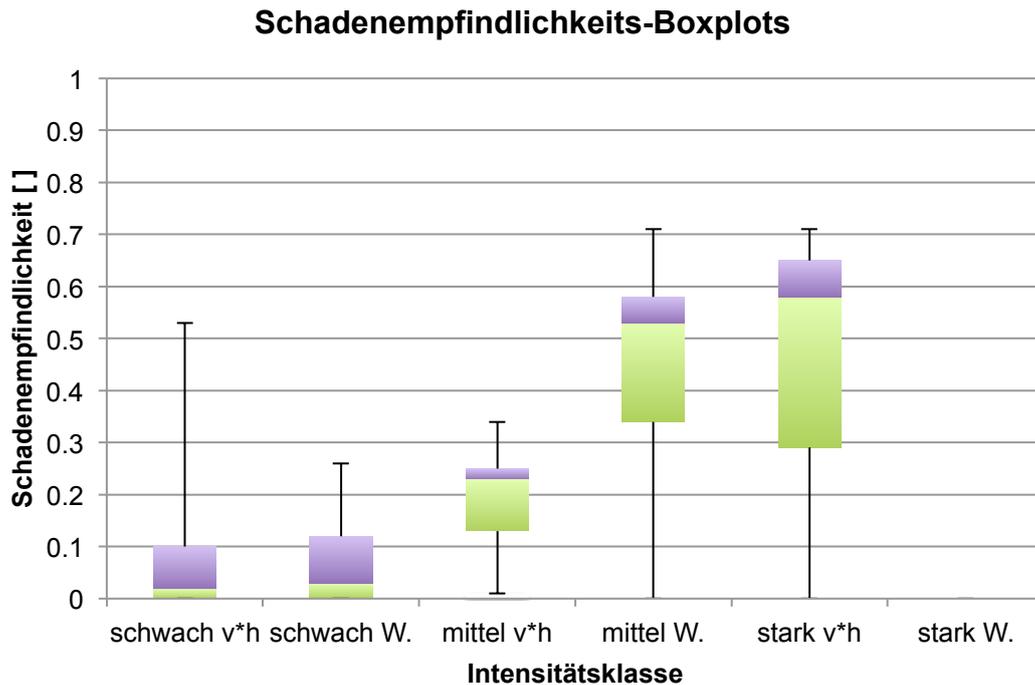


Abbildung 67: Vergleich der Schadenempfindlichkeits-Boxplots der Klassierungssysteme nach Loat und Petraschek (v*h) und dem schadenbasierten Klassierungssystem (W.).

6.6 Identifikation von Objekt- und Umgebungsparameter mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität

Für die Identifikation von Objekt- und Umgebungsparametern, welche potentiell in Baltschieder einen Einfluss auf die physische Vulnerabilität von Wohngebäuden genommen haben, wurden die Extremwerte der Schadenempfindlichkeit einer jeder Intensitätsklasse des neu entwickelten Klassierungssystems bezüglich ihrer Umgebung und Objekt spezifischen Unterschieden miteinander verglichen. Im Folgenden wird zunächst auf den Vergleich der Wohngebäude mit den Schadenempfindlichkeits-Extrema der schwachen Intensitätsklasse eingegangen. Danach werden noch die Gebäude mit Schadenempfindlichkeits-Minima und -Maxima der mittleren Intensitätsklasse miteinander verglichen.

6.6.1 Vergleich der Schadenempfindlichkeits-Extrema in der schwachen Intensitätsklasse

Innerhalb der schwachen Intensitätsklasse wies das Wohngebäude Nr. 5 die grösste Schadenempfindlichkeit mit 0.25 auf. Die betroffenen Wohngebäude Nr. 15, 17, 18, 19 und 20 der schwachen Intensitätsklasse nahmen trotz nachgewiesener, physikalischer Einwirkung keinen Schaden bei dem Ereignis. Die Schadenempfindlichkeit der Wohngebäude Nr. 15, 17, 18, 19 und 20 betrug dementsprechend 0.00, was gleichzeitig das Minimum der Schadenempfindlichkeit darstellt. Im Folgenden wird nun die angeströmte Fassade von Wohngebäude Nr. 5 mit denjenigen der Wohngebäude Nr. 15, 17, 18, 19 und 20 bezüglich Gebäudeöffnungen und allfälligen abschirmenden oder kanalisierenden Objekten in der Umgebung verglichen.

Gebäude Nr. 5 ist ein Einfamilienhaus. Es hat wie in Abbildung 68 A ersichtlich an der angeströmten Seite relativ grossflächige Fenstertüren, bei denen die Fensterscheibe praktisch bis auf die Geländeoberfläche reicht. Das Gebäude ist von einem Stahlzaun mit einer Höhe von 1.05 m umgeben. Wie bei der Feldaufnahme ersichtlich war, konnte die unterste Etage der Wohnnutzung zugeordnet werden.

Wie in Abbildung 68 B gezeigt, liegt das Wohngebäude Nr. 5 nicht erhöht und an einer Strasse, welche in Anströmrichtung verläuft. Im Bereich des Stahlzauns sind verschiedene Buscharten mit Wuchshöhen > 1 m gepflanzt.

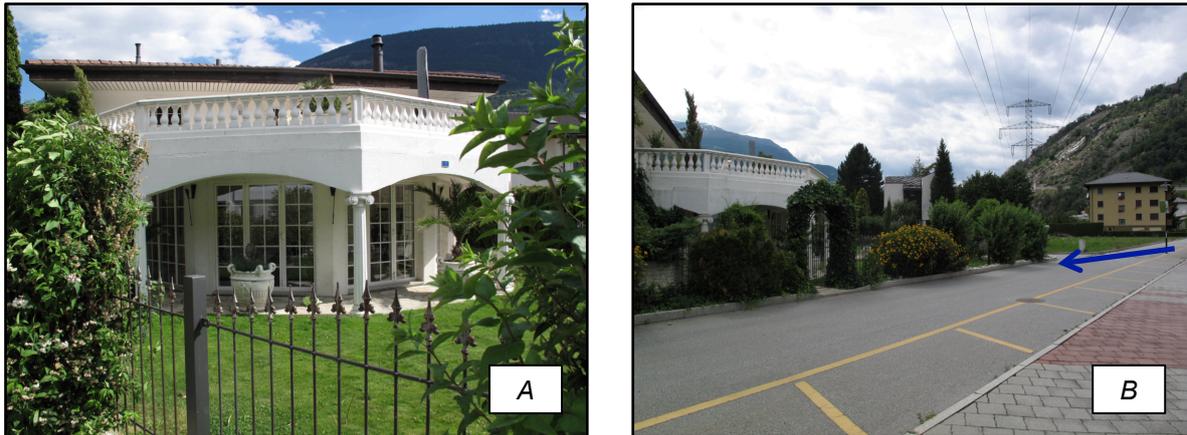


Abbildung 68: A: Angeströmte Fassade des untersuchten Wohngebäudes Nr. 5. B: Die mit einem blauen Pfeil markierte Anströmrichtung ist identisch zum Strassenverlauf.

Die angeströmten Fassaden der 5 Wohngebäude (Nr. 15, 17, 18, 19, 20) mit minimaler Schadenempfindlichkeit sind in den nachfolgenden Abbildungen 69, 70 und 71 dargestellt. Gebäude Nr. 15 und 19 sind Mehrfamilienhäuser, bei den restlichen Gebäuden handelt es sich um Einfamilienhäuser. Im Vergleich zum Wohngebäude Nr. 5 gibt es in keinem der Gebäude Fensterscheiben im Erdgeschoss, welche auf gleicher Höhe wie die Geländeoberfläche liegen. Fenster sind erhöht in die Fassade eingebaut und weisen im Vergleich zu den Fenstern von Wohngebäude 5 weniger grosse Flächen auf. In 4 der 5 Wohngebäude mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 liegen Garagentore aus Holz oder Metall im Erdgeschoss des Gebäudes in Anströmrichtung. Eingangstüren als weitere Art der Gebäudeöffnungen kommen bei Gebäude 17 und 20 bei der angeströmten Fassade vor. Die Eingangstüren liegen in beiden Fällen um 90 cm für Gebäude Nr. 17 beziehungsweise 51 cm für Gebäude Nr. 20 erhöht im Vergleich zur Geländeoberfläche.

In direkter Umgebung der Wohngebäude liegt in Anströmrichtung bei den Gebäuden Nr. 17 und 20 ein abschirmendes Objekt in Form eines Holz- und Stahlzaunes auf einem Betonsockel vor. Bei Gebäude Nr. 19 wird das direkte Anströmen der Hausfassade durch ein in Anströmrichtung angebautes Mehrfamilienreihenhaus verhindert. Bei den Gebäuden Nr. 15 und Nr. 18 ist ein ungehindertes Anströmen möglich oder wird im Fall des Mehrfamilienhauses Nr. 15 durch eine tiefer liegende Garageneinfahrt gar begünstigt. Sowohl bei Gebäude Nr. 18 als auch Nr. 15 bilden Garagentore die dominanten Öffnungen im Erdgeschoss. Aufgrund der fehlenden Fenster kann bei den Wohngebäuden Nr. 15, 17, 18 und 19 zudem eine Wohnnutzung der ersten Etage höchstwahrscheinlich ausgeschlossen werden.



Abbildung 69: A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 15. B: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 17 mit Stahlzaun auf Mauersockel im Vordergrund und der um 90 cm erhöhten Eingangstür.



Abbildung 70 : A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 18. B: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 19 mit vorgelagertem Mehrfamilienreihenhaus in Anströmrichtung.

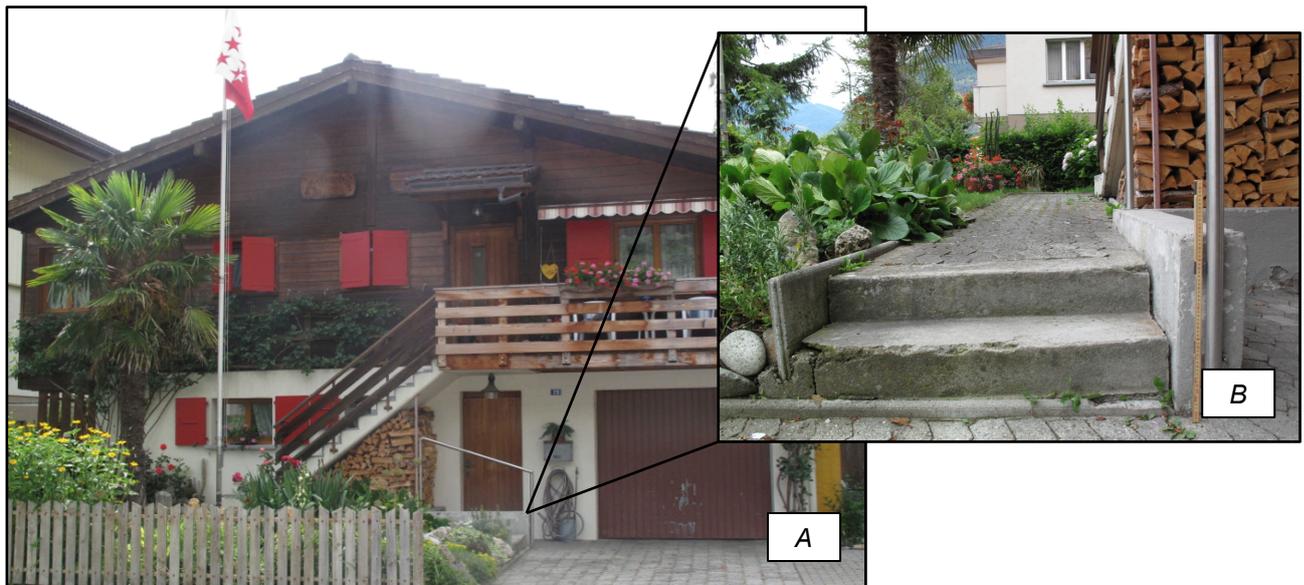


Abbildung 71: A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 20 mit Garagentor und Eingangstüre
 B: Durch Treppenabsatz gegenüber dem gewachsenen Terrain um 51 cm erhöhte Lage der Eingangstüre.

6.6.2 Vergleich der Extrema in der mittleren Intensitätsklasse

Innerhalb der mittleren Intensitätsklasse bildet Wohngebäude Nr. 1 mit 0.71 den positiven Extremwert bezüglich der Schadenempfindlichkeit. Wohngebäude Nr. 16 ist das Gebäude mit der kleinsten Schadenempfindlichkeit (0.00) innerhalb der mittleren Intensitätsklasse. Bei beiden Gebäuden handelt es sich um Einfamilienhäuser.

Wohngebäude Nr. 1 weist in Anströmrichtung des Überschwemmungsereignisses 2 relativ grosse Fenster als Gebäudeöffnungen auf (siehe Abbildung 73), welche beim Ereignis entsprechend der berechneten Wirkungshöhe auch erreicht wurden. Die 5 darüber liegenden schmalere Fenster der ersten Etage waren, wie anhand der Fliessspuren in Abbildung 72 zu sehen ist, nicht von der Überschwemmung betroffen. Als weitere Gebäudeöffnungen liegen ausserdem 3 Lüftungsschächte auf Geländeneiveau direkt an der Fassade. An der rechten Seite des Gebäudes in Anströmrichtung befindet sich zudem ein tiefer gelegener Eingang zum Untergeschoss, der über eine hinunterführende Treppe erreichbar ist. Das Gebäude liegt weder erhöht, noch wird das Anströmen durch irgendwelche Hindernisse und Objekte vor der Fassade erschwert. Wie bei der Besichtigung im Feld ersichtlich war, wird das Erdgeschoss im Gegensatz zum Untergeschoss als Wohnraum genutzt.



Abbildung 72: Photo von den Aufräumarbeiten mit Fliessspuren an der angeströmten Fassade, welche die maximale Wirkungshöhe markieren. Die Fenster in der oberen Etage wurden nicht erreicht und sind unversehrt (Photograph unbekannt).



Abbildung 73 : A: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 1 mit Lüftungsschächten (rote Pfeile), Fenstern und B: einem seitlichem Eingang ins Untergeschoss.

Im Gegensatz zum vorangehend beschriebenen Wohngebäude Nr. 1 hat Gebäude Nr. 16 nur ein kleines Fenster in Anströmrichtung der untersten Etage. Weitere Gebäudeöffnungen in Anströmrichtung in der untersten Etage bilden ein Garagentor und eine Eingangstür aus Holz.

Wie während den Feldaufnahmen durch Befragung des Eigentümers ausfindig gemacht werden konnte, wird die unterste Etage nicht als Wohnraum genutzt. Die einzigen zwei Fenster der mittleren Etage in Anströmrichtung wurden gemäss Kalibrierungsphotos und den Simulationsergebnissen nicht erreicht. Eingangstüre und weitere Gebäudeöffnungen liegen gegenüber dem normalen Terrain in Anströmrichtung um rund 3.50 m erhöht. Lüftungsschächte wie bei Wohngebäude Nr. 1 sind keine vorhanden. Zusammenfassend weist Gebäude Nr. 16 mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 also im Vergleich zu Gebäude Nr. 1 in Anströmrichtung weniger und mit Bezug auf die Fenster auch kleinere Gebäudeöffnungen auf. Die Wohnräume der zweiten Etage waren nicht vom Ereignis betroffen.



Abbildung 74: Angeströmte Fassade des Wohngebäudes Nr. 16. Die Anströmrichtung ist mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet.

6.7 Methodik der physischen Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT

Da die in dieser Arbeit entwickelte und an der Pilotstudie der Überschwemmung in Baltschieder im Jahr 2000 angewendete Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT ein wichtiges Resultat ist, wird hier eine kurze allgemeine Übersicht über die Methode für die weitere Anwendung auf andere Fallstudien gegeben (Abbildung 75). Eine detaillierte Beschreibung der Einzelschritte des methodischen Vorgehens in dieser Arbeit findet sich im Kapitel Methoden. Die Methodik kann grob in die Schritte Prozessrekonstruktion, Bestimmung der Intensitätsklassen und die eigentliche Bestimmung der physischen Vulnerabilität unterteilt werden. Der Schritt der Prozessrekonstruktion besteht dabei aus der Simulation mit BASEMENT und der Kalibrierung und Validierung mit Kalibrierungsdaten.

Für die Gittergenerierung mit BASEmesh in einer GIS-Umgebung wird ein Rasterdatensatz eines digitalen Höhenmodells des Geländes im Bereich des Gerinnes und der Schadenobjekte und ein Katasterplan als Vektordatei mit den Umrissen der Gebäude und Strassen als Bruchkanten benötigt. Das digitale Höhenmodell kann dabei in unterschiedlicher Auflösung für die gesamte Schweiz beim Bundesamt für Landestopographie bezogen werden. Die Katasterpläne erhält man auf Anfrage bei der

zuständigen Dienststelle des Kantons, der jeweiligen Gemeinde oder dem beauftragten Geometerbüro.

Das mit der BASEmesh Erweiterung im GIS erstellte Berechnungsgitter (2dm-File) dient in der darauf folgenden Simulation in BASEMENT als topographische Abbildung des Geländes. Neben dem 2dm-File sind die Abflussganglinie (Hydrograph) und die Sedimentganglinie während des Ereignisses weitere Inputdaten für die Simulation. Die Abflussganglinie wird dabei entweder aus Daten von Messstationen erstellt (sofern beim Ereignis nicht zerstört) oder anhand von Niederschlagsdaten in der Umgebung des Einzugsgebietes mit Niederschlags-Abflussmodellen rekonstruiert. Die Sedimentganglinie wird mit den berechneten Abflusswerten und einer empirischen Formel berechnet. Als Ausgabedaten der Simulation resultieren schliesslich Daten zu Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten für die angeströmte Fassadenseite eines Gebäudes über den gesamten Zeitraum des Ereignisses.

Die aus den jeweiligen Simulationseinstellungen resultierenden Ablagerungshöhen werden anhand von Photos, Videos oder Karten solange angepasst, bis sie möglichst genau mit den realen Ablagerungshöhen übereinstimmen. Dieser Schritt ist in der unten stehenden Graphik (Abbildung 75) als Kalibrierung zusammengefasst.

Sobald die Simulation kalibriert ist, werden die an der angeströmten Gebäudeseite bestimmten Intensitätswerte für Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten über das ganze Ereignis von BASEMENT in ein Excel-File exportiert. Dort werden die zeitlich maximalen Werte der Ablagerungshöhen und -geschwindigkeiten bestimmt und miteinander addiert um die effektive Wirkungshöhe zu erhalten.

Die effektiven Wirkungshöhen zusammen mit den Fliessgeschwindigkeiten zum gleichen Zeitpunkt werden dann entsprechend den in dieser Arbeit definierten Klassengrenzen für die Zuordnung der Gebäude zu den drei Intensitätsklassen verwendet.

In einem letzten Schritt werden die so gebildeten Intensitätsklassen schliesslich mit den lokalisierten Schadenempfindlichkeiten verknüpft, um auf die physische Vulnerabilität schliessen zu können. Die Lokalisierung erfolgt dabei durch Postadressen mit den entsprechenden Schadenempfindlichkeiten auf Objektstufe welche von der Versicherungsgesellschaft zur Verfügung gestellt werden. Dabei empfiehlt es sich, die Schadenempfindlichkeit als Quotient der Schaden- und Versicherungssumme direkt durch die Versicherung berechnen zu lassen, damit man dem Datenschutz gerecht wird und nicht direkt mit sensiblen Daten der Versicherungssumme und der Schadenempfindlichkeit arbeitet. Die physische Vulnerabilität wird schliesslich für jede Intensitätsklasse in Form von statistischen Masszahlen wie Mittelwert, Median, 0.25-, 0.75-Quartil, Interquartilsabstand, Minima, Maxima oder der Spannweite ausgedrückt.

PROZESSREKONSTRUKTION

PHYSISCHE VULNERABILITÄT

SIMULATION

KALIBRIERUNG

ZUORDNUNG INTENSITÄTSKLASSEN

BESTIMMUNG SCHADENEM.

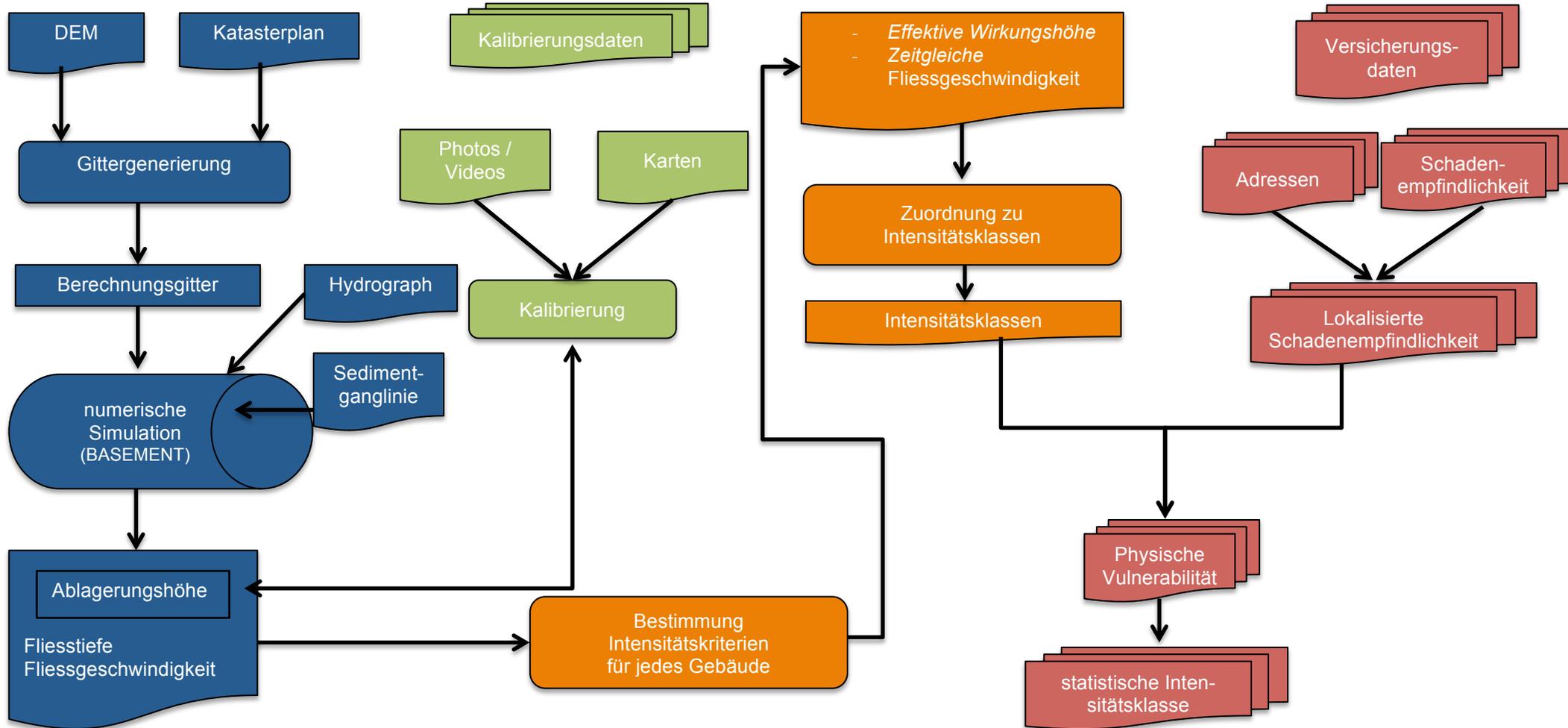


Abbildung 75: Schematische Darstellung der vorgeschlagenen Methode zur Vulnerabilitätsanalyse

KAPITEL 7: DISKUSSION

Im Folgenden werden die in Kapitel 6 dargestellten Resultate diskutiert und interpretiert. Die Diskussion folgt dabei der gleichen thematischen Reihenfolge wie im Methoden- und Resultateteil dieser Arbeit. Zunächst wird näher auf die Simulationsergebnisse der Prozessrekonstruktion eingegangen. Dabei werden die auf der Simulation beruhenden Kriterien der effektiven Wirkungshöhe, Fließgeschwindigkeit und v^*h jeweils einzeln besprochen. Auf die räumliche Verteilung der Schadenempfindlichkeitswerte und die Erklärung des Schadenempfindlichkeitswertes von Gebäude Nr. 13 wird anschliessend daran eingegangen. Das Klassierungssystem v^*h und seine Limitationen ist dann das Thema in Kapitel 7.3.1, bevor zur Diskussion der gefundenen physischen Vulnerabilitätswerte beider Klassierungssysteme in Kapitel 7.4 übergegangen wird. In Kapitel 7.5 werden dann in dieser Arbeit identifizierte Objekt- und Umgebungsparameter interpretiert und eine mögliche, an feststoffführende, dynamische Überschwemmungen angepasste Bauweise vorgeschlagen. In 7.6 schliesslich werden die Einzelschritte der vorgeschlagenen Methode zur Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT besprochen und Unsicherheiten und Limitationen aufgezeigt. Es sei hier schon vorweggenommen, dass sich grundsätzlich alle Interpretationen ausschliesslich auf die Fallstudie in Baltschieder beziehen und aufgrund des geringen Stichprobenumfangs dieser Studie keine allgemeingültigen Aussagen gemacht werden können.



Titelbild von Kapitel 7: Ansicht eines stark von Geschiebeablagerungen betroffenen Dorfteils in Balt-schieder (Photograph unbekannt).

7.1 Simulationsergebnisse

Zur Bestimmung der Intensitätskriterien sind, wie besprochen, Werte zu Ablagerungshöhen, Fliesstiefen und -geschwindigkeiten während des gesamten Ereignisses und über den gesamten Schwemmkegel berechnet worden. Nachfolgend wird zunächst das kalibrierte Simulationsergebnis anhand eines Vergleichs zwischen den simulierten Ablagerungshöhen und den Ablagerungshöhen auf den Kalibrierungsphotos besprochen. Danach folgt die Diskussion der für das neu entwickelte Klassierungssystem verwendeten Intensitätswerte effektive Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit. Zum Schluss werden dann noch die Simulationsergebnisse bezüglich des Intensitätskriteriums $v \cdot h$ besprochen.

7.1.1 Simulierte Ablagerungshöhen

In der unten stehenden Abbildung 76 ist das kalibrierte Simulationsergebnis der Ablagerungshöhen am Ende des Ereignisses dargestellt. Der Vergleich mit der räumlichen Ausdehnung der Sedimentablagerungen in der Kalibrierungskarte (Abbildung 41) zeigt, dass die mit Feinanteilen und Geschiebe bedeckten Flächen relativ gut durch die Simulation abgebildet werden konnten. Die räumliche Ausdehnung der Ablagerungshöhen über den Schwemmkegel kann über das gesamte Überschwemmungsgebiet betrachtet als relativ konsistent zur Kalibrierungsgrundlage angesehen werden.

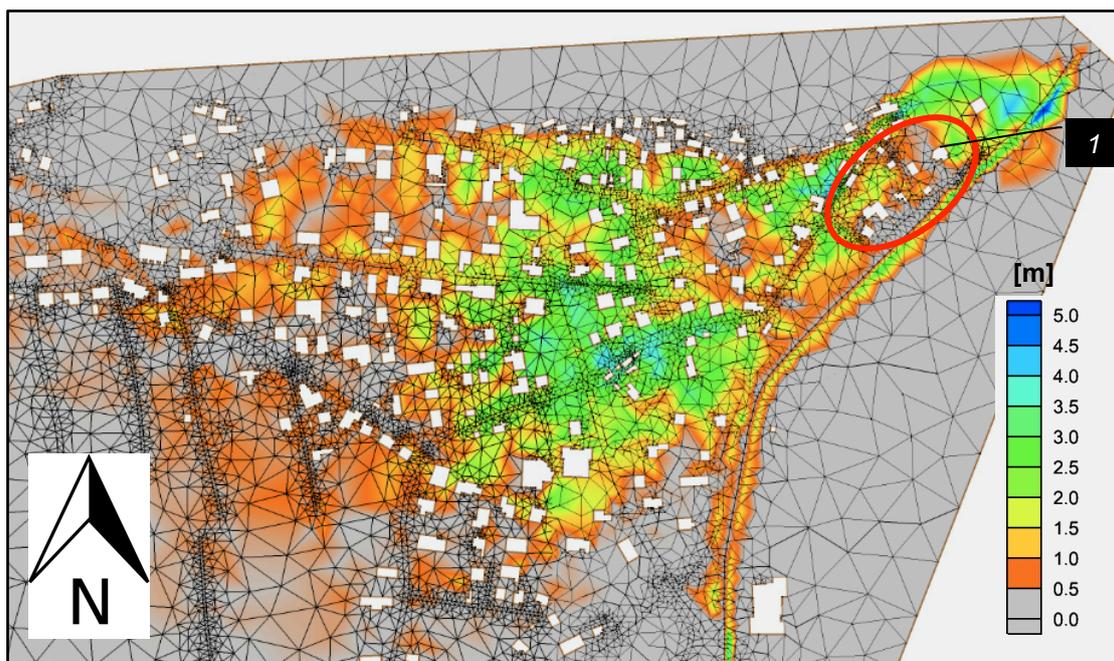


Abbildung 76 : Kalibriertes Endergebnis der Ablagerungshöhen. Gebäude Nr. 1 aus Abbildung 49 ist zur besseren Orientierung markiert.

Grössere Abweichungen bezüglich der räumlichen Ausdehnung gibt es vor allem im rot umkreisten Bereich vor Gebäude Nr. 1 (Abbildung 49). Hier kommt es in der Simulation zu keinen grösseren Sedimentablagerungen. Auf verschiedenen Kalibrierungsphotos, wie beispielsweise im Kalibrierungsphoto Nr. 4 in Tabelle 36 im Anhang oder auf Abbildung 77 zu sehen, betrug die Ablagerungshöhe hier jedoch nachgewiesen mehrere Meter. Diese Differenz zwischen Realität und Simulationsergebnis ist wahrscheinlich zum Teil auf das angepasste Höhenmodell im Bereich des nach dem Ereignis neu erstellten Dammes zurückzuführen. Wie in Kapitel 5.1.1 dargelegt, ist das DHM an dieser Stelle flächenhaft auf eine Meereshöhe von 658 m.ü.M gesetzt worden, um den zum Zeitpunkt des Ereignisses noch nicht bestehenden Damm in der Simulation nicht zu berücksichtigen. Durch diesen Eingriff in die

Topographie ist das Gelände lokal künstlich verflacht worden und mag somit im Detail nicht mehr dem Zustand zum Zeitpunkt des Ereignisses am 15. Oktober 2000 entsprechen. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Fliesswege in der Simulation lokal anders verlaufen als in der Realität, wodurch die Ablagerungen vor Gebäude Nr. 1 in BASEMENT so nicht nachgebildet werden konnten. Da sich die räumliche Verteilung der simulierten Sedimentakkumulation ansonsten jedoch relativ deckungsgleich zu der Kalibrierungsgrundlage präsentierte und zudem kein zu untersuchendes Gebäude im besprochenen Bereich lag, wurde darauf verzichtet das DHM erneut anzupassen. Dies auch vor dem Hintergrund, dass eine erneute Anpassung der Topographie am Standort des heutigen Geschieberückhaltedammes mit grösseren Unsicherheiten bezüglich der genauen Ausprägung des Zustandes vor dem Dammbau behaftet gewesen wäre.



Abbildung 77: Kalibrierungsphoto mit stark mit Sediment überschüttetem Bereich vor Gebäude Nr.1, in welchem es in der Simulation zu keinen Ablagerungen kommt (Photo: Andreas Götz).

In Tabelle 36 im Anhang sind anhand von Kalibrierungsphotos geschätzte und durch die Simulation berechnete Ablagerungshöhen, sowie die Differenz zwischen den beiden Werten aufgeführt. Es soll damit ein grober Überblick über die Konsistenz der Simulationsergebnisse zur Kalibrierungsgrundlage und die Genauigkeit der Simulationsergebnisse gegeben werden. Die Nummerierung der Photos bezieht sich auf den in Abbildung 41 markierten Standort der Kalibrierungsphotos auf dem Schwemmkegel.

Mit Blick auf Tabelle 36 wird deutlich, dass die Simulationsergebnisse die Ablagerungshöhen auf den Kalibrierungsphotos mehrheitlich relativ genau abbilden. Über alle Kalibrierungsphotos gesehen ergibt sich zwischen den Simulationsergebnissen und den Kalibrierungsphotos eine mittlere Abweichung von rund 20 cm. Die grössten Differenzen zwischen Simulation und Kalibrierungsphotos ergeben sich bei Photo Nr. 4 mit 74 cm. Photo Nr. 4 wurde dabei im in Abbildung 76 mit einer roten Ellipse markierten Bereich aufgenommen. Somit weist das Gebiet vor Gebäude Nr. 1 nicht nur in der räumlichen Ausdehnung, sondern auch in den quantitativen Ablagerungshöhen die grössten Abweichungen auf. Auch dies kann mit der oben beschriebenen Anpassung des Höhenmodells am Standort des neuen Dammes erklärt werden.

Betrachtet man die in Abbildung 41 dargestellte Lage der Gebäude auf den Kalibrierungsphotos so fällt auf, dass sich der Grossteil davon auf den Bereich mit Geschiebeablagerung konzentriert. Nur 3 Photos von Gebäuden (Nr. 8/9/10) stammen von Flächen, auf welchen vor allem Feinanteile sedimentiert wurden. Im Rahmen der Recherche für diese Arbeit konnten nicht mehr Bildmaterial von den mit Feinmaterial übersäten Flächen gesammelt werden. Dies mag zum Teil daran liegen, dass vor allem die von mächtigen Geschiebeablagerungen betroffenen Bereiche des oberen, alten Dorfteils medien-

wirksam waren. Die weniger imposanten Feinsedimentablagerungen in den unteren Dorfteilen wurden weniger als Bildmaterial festgehalten.

Aufgrund der daraus resultierenden Kalibrierungsgrundlage sind die in Abbildung 41 markierten Bereiche mit Feinanteilablagerung bezogen auf die Ablagerungshöhe in den Simulationsergebnissen mit grösserer Unsicherheit behaftet. Obwohl die Simulationsergebnisse einigermaßen konsistent zur Kalibrierungsgrundlage sind, kann also nicht zwingend von einer flächendeckend, absolut detailgetreuen Nachbildung des Ereignisses über den gesamten betroffenen Schwemmkegel ausgegangen werden. Eine weitere Unsicherheit liegt in einigen Kalibrierungsphotos, welche erst während der Aufräumarbeiten aufgenommen wurden. Hier kann es potentiell zu Ungenauigkeiten in der Abschätzung der Ablagerungshöhe kommen, da auf den Photos nicht die Ablagerungshöhe direkt nach dem Ereignis zu sehen ist. Die Ablagerungshöhen mussten in diesen Fällen anhand von Schmutzspuren an der Gebäudedefassade rekonstruiert werden. Nichts desto trotz liegen diese Ungenauigkeiten wahrscheinlich ohnehin in der Genauigkeit der Simulationssoftware.

7.1.2 Simulationsergebnisse der effektiven Wirkungshöhe

Wie in Tabelle 16 dargestellt, sind die Fliesstiefen zum Zeitpunkt der maximalen effektiven Wirkungshöhe bei allen untersuchten Gebäuden relativ homogen. Die Ablagerungshöhen variieren hingegen mitunter stark. Die effektive Wirkungshöhe als Summe von zeitgleich maximaler Ablagerungshöhe und Fliesstiefe wird in der vorliegenden Fallstudie deshalb vor allem durch die Ablagerungshöhe gesteuert. Zu grossen effektiven Wirkungshöhen kommt es dementsprechend dort, wo viel Material abgelagert wurde und die Ablagerungshöhe dadurch gross ist. Dass sich die Gebäude, auf welche effektive Wirkungshöhen von > 1 m eingewirkt haben, allesamt auf den Kegelhalbereich konzentrieren, lässt sich durch den in Kapitel 2.3.3.3 beschriebenen Ablagerungsprozess begründen. Beim Übergang vom Baltschiedertal ins Rhonetal ergibt sich ein typischer Gefällsknick mit starker Abnahme des Gefälles im Längsprofil des Baltschiederbaches. Hier nahm am 15. Oktober bedingt durch die Geländeverflachung die Fließgeschwindigkeit ab, wodurch es zu einer Aufschotterung des Gerinnes sowie des Geschieberückhaltebeckens kam, welche schliesslich zur Überschwemmung führte. Das Aussern des vorher kanalisiert im Gerinne verlaufenden Baltschiederbachs hatte gleichzeitig eine Vergrösserung des Fliessquerschnittes zur Folge, was wiederum eine Abnahme der Fliesstiefe mit sich brachte. Die geringeren Fliesstiefen und -geschwindigkeiten hatten in Kombination eine Abnahme der für den Transport massgebenden Schleppspannung unter einen kritischen Wert zur Folge. Aus diesem Grund lagerte der Baltschiederbach am Kegelhal schlagartig das meiste grobe Geschiebe ab. Somit führte dies zu den am Kegelhal simulierten hohen Ablagerungshöhen und damit zu den hohen effektiven Wirkungshöhen. Es folgte eine mit der weiteren Abnahme der Schleppspannung einhergehende sukzessive Ablagerung von zunehmend feinerem und weniger werdendem Material mit zunehmendem Abstand zum Kegelhal wie in Abbildung 41 dargestellt. Bezüglich der Abnahme der abgelagerten Korngrösse und Ablagerungsmächtigkeit vom Kegelhal zum Vorfluter hin können die Simulationsergebnisse also als sinnvoll angesehen werden.

Wie besprochen konnten bei Gebäude Nr. 13 weder Ablagerungshöhen, Fliesstiefen noch -geschwindigkeiten nachsimuliert werden. Der Grund dafür liegt in der Lage des Gebäudes. Wie in Abbildung 78 ersichtlich, wurde das Gebäude auf einem 1.85 m hohen Mauerabsatz erhöht gebaut. Diese erhöhte Lage wird vom verwendeten Höhenmodell swissALTI^{3D} in der Topographie des Berechnungsgitters wiedergegeben, weshalb BASEMENT bei der Simulation keine Einwirkung der Überschwemmung berechnete. Die simulierten Wirkungshöhen in diesem Bereich waren zu gering um eine Einwirkung der dynamischen Überschwemmung bis zur erhöhten Gebäudedefassade zu ermöglichen, was mit Blick auf das Kalibrierungsphoto Nr. 13 im Anhang auch der Realität entspricht.

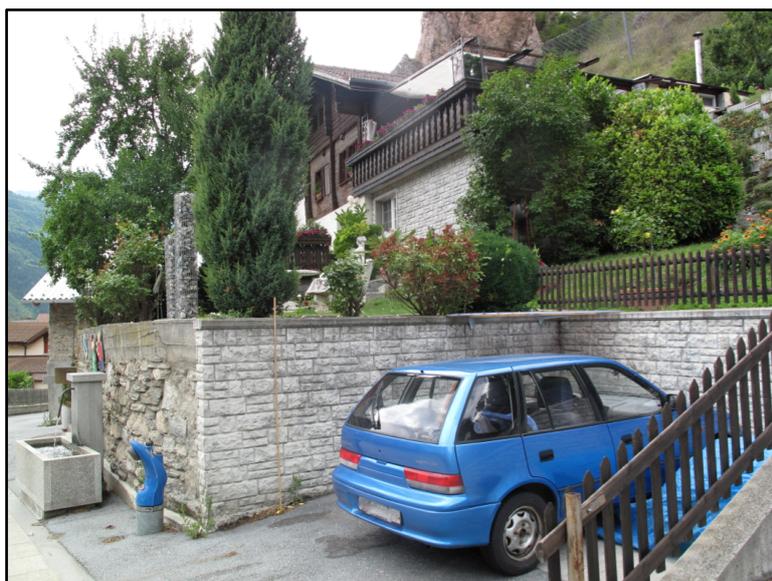


Abbildung 78: Gebäude Nr. 13 mit erhöhter Lage durch Mauerabsatz.

7.1.3 Simulationsergebnisse der Fließgeschwindigkeiten

Das Ereignis in Baltschieder im Jahr 2000 kann in Hinblick auf die berechneten Fließgeschwindigkeiten als Ganzes klar als dynamische Überschwemmung charakterisiert werden. Mit Blick auf die räumliche Verteilung der Fließgeschwindigkeiten in Abbildung 54 wird jedoch klar, dass es auch Bereiche gab, welche von der Prozesscharakteristik her mit Fließgeschwindigkeiten < 1 m/s eher von einer statische Überschwemmung betroffen waren. Die räumliche Verteilung der 9 von Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s betroffenen Gebäude der Simulation kann durch die dominante Fließrichtung erklärt werden. So liegen die Gebäude mit einer Einwirkung von > 1 m/s alle in der per Simulation ersichtlichen dominanten Fließrichtung der Überschwemmung. In lateral daran angrenzenden Bereichen im Süden und Norden zeigt die Simulation maximale Fließgeschwindigkeiten von < 1 m/s. Dieser eher statische Charakter der Überschwemmung lässt sich mit Blick auf die in Abbildung 79 dargestellten Übersichtsphotos zumindest im Bereich der Gebäude Nr. 8, 17 und 18 bestätigen. Wie das Photo im Bereich von Gebäude Nr. 8 vermuten lässt, kann die statische Überschwemmung in diesem Bereich wahrscheinlich zum Teil mit dem Aufstau des abfließenden Wassers der Überschwemmung des Baltschiederbaches durch die Uferdämme der Rhone erklärt werden. Da die Uferdämme der Rhone im Schnitt nämlich rund 4 m (Kanton Wallis, 2008) über dem gewachsenen Terrain liegen, wurde das Wasser aufgrund eher geringen Wasserständen in der Talebene daran gehindert, in seinen Vorfluter die Rhone zu fließen.

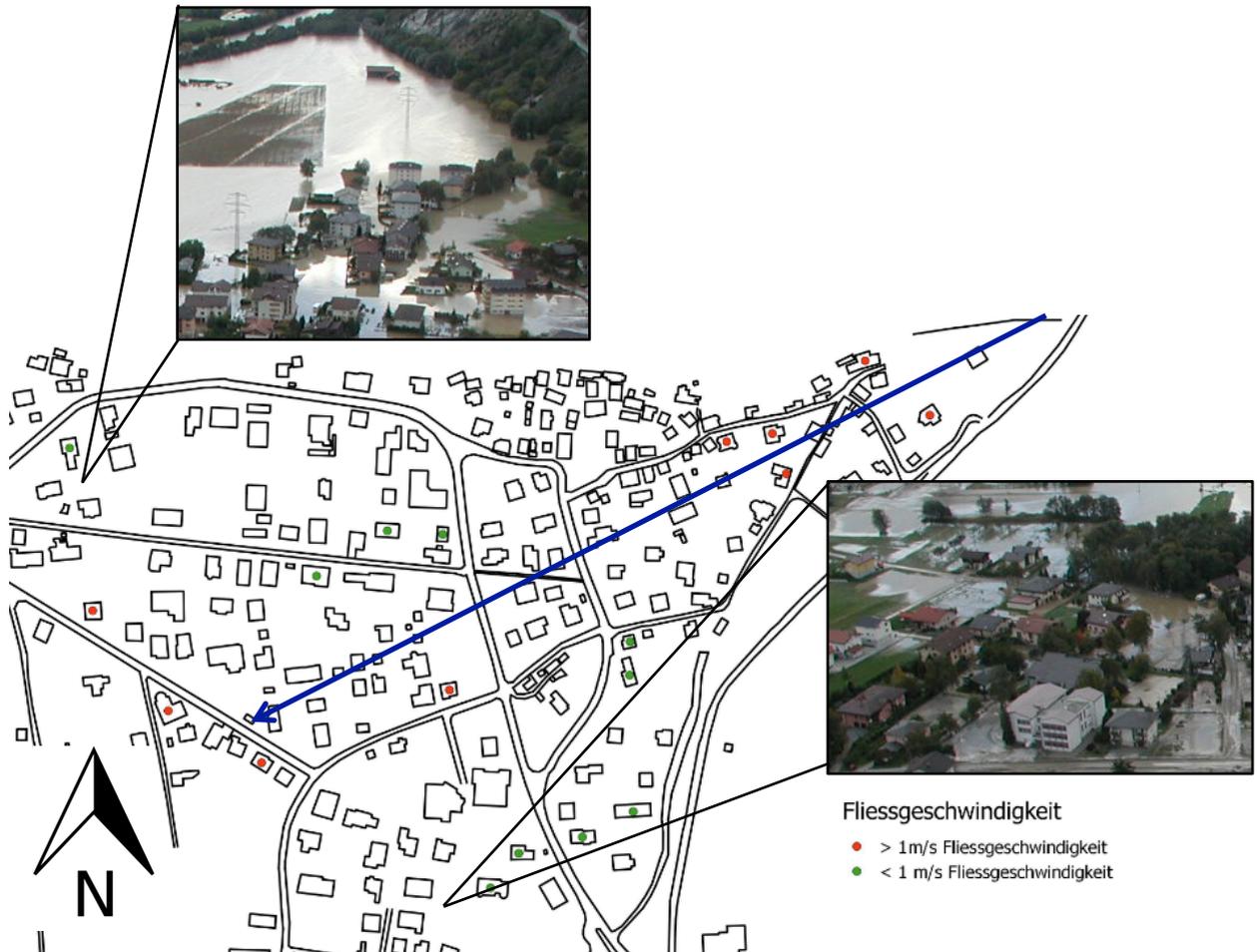


Abbildung 79: Räumliche Verteilung der simulierten Fließgeschwindigkeit > 1 m/s und < 1 m/s. Die dominante Anströmrichtung des Ereignisses ist mit einem blauen Pfeil markiert. Zwei Photos vom Ereignis in der Umgebung der Wohngebäude Nr. 8, 17 und 18 verifizieren den statischen Charakter der Überschwemmung im Simulationsergebnis. (Photos: Andreas Götz).

7.1.4 Simuliertes Intensitätskriteriums $v \cdot h$

Wie in Kapitel 6.1.2 festgestellt, ist in den Simulationsergebnissen keine klare Tendenz zu einer Abnahme der $v \cdot h$ -Werte mit zunehmendem Abstand vom Kegelhals erkennbar. Dieser Umstand lässt sich wohl mit dem Faktor der Fließgeschwindigkeit erklären, welche wie beim Kriterium der effektiven Wirkungshöhe (Abbildung 79) entlang der dominanten Fließrichtung am höchsten sind. Dies führt dazu, dass beispielsweise Gebäude Nr. 5, 6 und 7, die zwar weit entfernt vom Kegelhals aber direkt in der Fließrichtung der Überschwemmung liegen, trotzdem noch einer relativ hohen Fließgeschwindigkeit ausgesetzt waren. Trotz den tendenziell geringeren Fliesstiefen, in diesen vom Kegelhals weiter entfernten Gebieten, führen somit die hohen Fließgeschwindigkeiten bei Multiplikation mit den Fliesstiefen zu hohen $v \cdot h$ -Werten, wie in den Simulationsergebnissen ersichtlich ist.

Der Umstand, dass sich die grössten simulierten Fliesstiefen an den untersuchten Gebäuden alle auf den oberen, alten Dorfteil in der Nähe des Kegelhals konzentrieren, ist ebenfalls sinnvoll. In diesem Teil des Dorfes sind die Häuser zum Teil wie in Abbildung 80 A gezeigt, sehr nahe aneinander gebaut, so dass die Überschwemmung durch die Gebäudefassaden kanalisiert wurde und die Fliesstiefen, wie simuliert, aufgrund des geringeren Fließquerschnittes entsprechend hoch waren. In anderen Dorfteilen weiter entfernt vom Kegelhals, welche meist in jüngerer Zeit gebaut wurden, gibt es zwischen den

Gebäuden noch grosszügige Freiräume in Form von Wiesen (Abbildung 80 B). Dadurch konnte sich das Wasser hier grossflächiger verbreiten, was als Folge davon auch zu geringeren Fliesstiefen führte, wie sie in BASEMENT simuliert wurden.

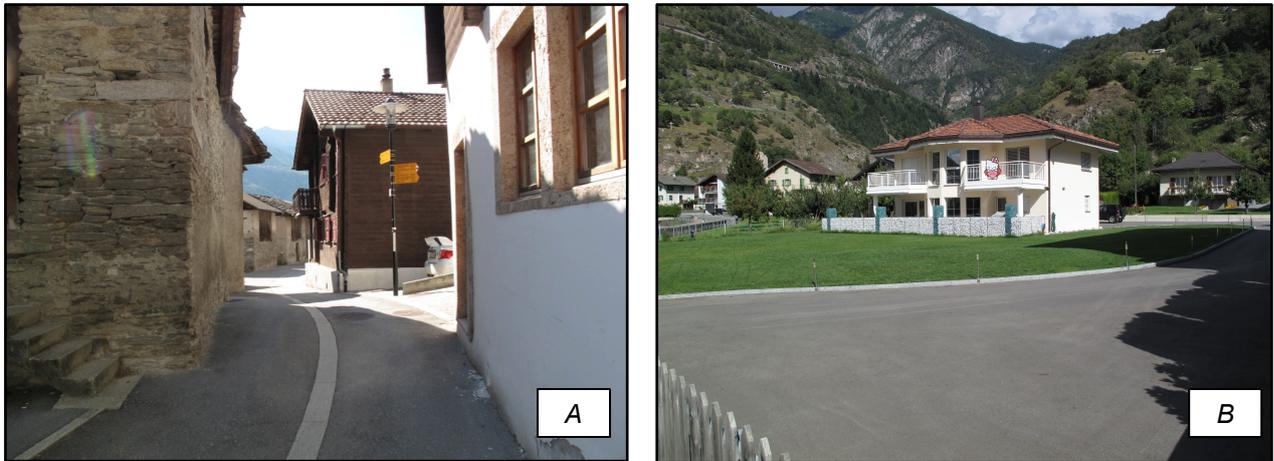


Abbildung 80: A: Enge Häuserzeilen im Alten Dorfteil in der Nähe des Kegelhalses. B: Lockerere Bauweise mit Wiesenstücken zwischen den Wohngebäuden im neueren Dorfteil mit einigem Abstand zum Kegelhals.

7.2 Schadenempfindlichkeit

Wie in 7.1.2 dargelegt, konnte für Gebäude Nr. 13 die physische Vulnerabilität trotz vorhandener Schadenempfindlichkeit nicht hergeleitet werden, da das Gebäude nicht direkt von der physischen Einwirkung der dynamischen Überschwemmung betroffen war. Eine mögliche Erklärung für den augenscheinlich aufgrund des Schadenempfindlichkeitswertes von 0.02 trotzdem entstandenen Schaden könnte in der vom wirklich betroffenen Schadenobjekt differierende Adresse der Versicherungspolice liegen. Möglicherweise war über die auf der Adresse von Gebäude Nr. 13 lautende Police nämlich ein anderes Gebäude versichert, auf welches die dynamische Überschwemmung direkt eingewirkt und zu einem Schaden geführt hat. Dieser Schaden wurde aber schliesslich über die Adresse der Versicherungspolice und nicht der Adresse des Schadenobjektes verrechnet, weshalb der Schadenempfindlichkeitswert falsch lokalisiert wurde. Dies würde auch erklären, weshalb das Wohngebäude Nr. 13 als praktisch einziges Gebäude im oberen, alten Dorfteil eine derart geringe Schadenempfindlichkeit aufweist. Ein weiterer Erklärungsansatz dafür könnte die Einwirkung von Oberflächenabfluss von den an das Gebäude angrenzenden Hängen sein. Aufgrund der erhöhten Hanglage des Gebäudes sind andere schadenverursachende Prozesse wie Grundwasseraufstoss oder Kanalisationsrückstau eher auszuschliessen.

Die in Abbildung 56 dargelegte räumliche Verteilung der Schadenempfindlichkeiten der anderen Gebäude suggeriert eine abnehmende Schadenempfindlichkeit mit zunehmendem Abstand vom Kegelhals. Dies mag mehrere Ursachen haben: Zum einen nimmt die Prozessintensität (vor allem die effektive Wirkungshöhe) mit zunehmendem Abstand von der Transitstrecke in den Ablagerungsbereich zu sehends ab; die physikalische Einwirkungen auf die Gebäudestruktur sind demzufolge geringer. Zum anderen schirmen weiter oben in Prozessrichtung gelegene Gebäude, darunter liegende Gebäude gegenüber den physikalischen Einwirkungen womöglich zum Teil auch ab, wodurch der resultierende Schaden ebenfalls geringer ausfällt. Es kommt dabei zu Schatteneffekten wie sie bereits von Spichtig und Bründl (2008) in ihrer Studie beobachtet wurden. Gebäude Nr. 3 und Nr. 4 in Abbildung 56 könnten Ausdruck eines solchen Schatteneffekts in Baltschieder sein.

7.3 Zuordnung zu den Intensitätsklassen – das Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997)

In der vorliegenden Arbeit wurden mit v^*h und effektiver Wirkungshöhe/Fliessgeschwindigkeit zwei verschiedene Arten der Zuordnung zu den Intensitätsklassen vorgenommen. Die Anwendung von Klassierungssystemen und das Setzen von Klassengrenzen stellen dabei immer eine Art der menschlichen Wertung mit einem bestimmten Ziel dar. Für Vulnerabilitätsanalysen stellt dieses Ziel eine Klassenzuordnung dar, welche dem Zusammenhang zwischen Prozessintensität und Schadenempfindlichkeit möglichst gut gerecht wird. Mit anderen Worten: Die Klassengrenzen eines Klassierungssystems mit schwacher, mittlerer und starker Intensität sollten so definiert werden, dass hohe Schadenempfindlichkeiten der starken, mittlere Schadenempfindlichkeiten der mittleren und geringe Schadenempfindlichkeiten der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet werden. Dabei ist die Schadenempfindlichkeit durch Werte zwischen 0.00 (kein Schaden) und 1.00 (Totalschaden) definiert (Lo et al., 2012). Um die physische Vulnerabilität möglichst gut mit geringer Streuung zu beschreiben, sollten die Klassengrenzen also so gesetzt werden, dass die Schadenempfindlichkeit bei der schwachen Intensitätsklasse möglichst gegen 0.00 und bei der starken Intensitätsklasse möglichst gegen 1.00 strebt. Für die mittlere Intensitätsklasse wären somit vor dem Hintergrund dieser Argumentation Schadenempfindlichkeiten um 0.50 optimal.

Wie in 3.2.2.1 dargelegt war bei der Definition der Klassengrenzen des Intensitätskriteriums v^*h jedoch das primäre Ziel, die Gefährdung des Menschen gegenüber einer dynamischen Überschwemmung zu berücksichtigen. Das Klassierungssystem mit dem Intensitätskriterium v^*h hat somit nicht vordergründig die Absicht den der physischen Vulnerabilität zu Grunde liegenden Zusammenhang zwischen Schadenempfindlichkeit und Prozessintensität abzubilden. Bei v^*h wird ausserdem mit v nur die blosse Fliessgeschwindigkeit verwendet und nicht die Fliessgeschwindigkeit im Quadrat, welche gemäss der Formeln 11 und 13 für die physikalische Einwirkung aus hydrodynamischer Beanspruchung und Anprallenergie entscheidend wäre. Aus diesen Gründen können das v^*h -System und die diesbezüglich gesetzten Klassengrenzen bei der Anwendung in Vulnerabilitätsanalysen möglicherweise problematisch sein. Von diesem Standpunkt geht auch Choffet (2013) in seiner Dissertation aus, in der er festhält, dass eine Analyse der Vulnerabilität und des Risikos basierend auf den Intensitätskriterien nach Loat und Petraschek (1997) nicht oder nur schwierig möglich ist. Im folgenden Unterkapitel werden derartige Limitationen besprochen.

7.3.1 Limitationen des Intensitätskriteriums v^*h im Kontext von Vulnerabilitätsanalysen

Betrachtet man die Zuordnungen zu den Intensitätsklassen in dieser Fallstudie, fällt unter anderem Gebäude Nr. 3 beim Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) auf. Trotz einer relativ hohen Schadenempfindlichkeit von 0.53 wird dieses Gebäude nämlich der schwachen Intensitätsklasse zugeordnet. Diese Zuordnung von Gebäude Nr. 3 zeigt womöglich eine Limitation des Klassierungssystems auf. Aufgrund der geringen Fliesstiefe von 0.36 m resultiert bei diesem Gebäude bei der Multiplikation mit der Fliessgeschwindigkeit ein Wert $< 0.50 \text{ m}^2/\text{s}$, welcher für die Zuordnung zur schwachen Intensitätsklasse verantwortlich ist. Im Vergleich dazu wird dieses Gebäude bei dem auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Klassierungssystem der mittleren Intensitätsklasse zugerechnet, was in Hinblick auf die mittlere Schadenempfindlichkeit von 0.53 auch sinnvoller erscheint.

Wenn man davon ausgeht, dass Fenster als Gebäudeöffnungen neben der Prozessintensität einen zentralen Einfluss auf die physische Vulnerabilität nehmen (Papathoma-Köhle, 2012a), kann das verwendete Kriterium der effektiven Wirkungshöhe als Grund für diese passendere Zuordnung angesehen werden. Dieses Kriterium berücksichtigt nämlich neben der Fliesstiefe auch noch die Ablage-

runghöhe zum gleichen Zeitpunkt. Die Ablagerungshöhe ist für das Erreichen von Fenstern und damit für die Schadenentstehung im Innern eines Gebäude mitverantwortlich. Die steigende Schadensumme durch Schäden im Gebäudeinnern und die somit steigende Schadenempfindlichkeit eines Gebäudes findet somit Eingang ins Intensitätskriterium. Dieser Mechanismus ist im primär auf Gefährdung basierendem Kriterium $v \cdot h$ nicht berücksichtigt, weshalb in einem Fall wie bei Gebäude Nr.3 bei dem die Fliesstiefe < 1 m ist, keine optimale Zuordnung der Schadenempfindlichkeit zu einer Intensitätsklasse gewährleistet werden kann.

Weiter wurden die Gebäuden Nr. 5, 6, 7 und 14 trotz relativ geringen Schadenempfindlichkeiten von 0.01 bis 0.25 mit dem Klassierungssystem nach Loat und Petraschek (1997) der mittleren Intensitätsklasse zugeordnet. Hier waren trotz geringen Fliesstiefen entsprechend hohe Fließgeschwindigkeiten für die Zuordnung zur mittleren Intensitätsklasse verantwortlich. Beim neu entwickelten Klassierungssystem wurde hier aufgrund der effektiven Wirkungshöhe jeweils eine Zuordnung zur schwachen Intensitätsklasse vorgenommen, was den geringen Schadenempfindlichkeitswerten besser entspricht. Wie die Gebäude Nr. 5, 6, 7 und 14 und das Beispiel von Gebäude Nr. 3 zeigen, muss die Verknüpfung der Fliesstiefe und -geschwindigkeit über eine Multiplikation als Intensitätskriterium für Vulnerabilitätsanalysen kritisch gesehen werden, da damit unter Umständen schadensverursachende Mechanismen nicht berücksichtigt werden.

Grundsätzlich kann die Multiplikation von v und h bezogen auf die Schadenentstehung als Folge des durch Fenster eindringenden Wasser-Feststoffgemisches ein trügerisches Intensitätskriterium darstellen, da sowohl eine hohe Fliesstiefe als auch eine hohe Fließgeschwindigkeit zum exakt gleichen Intensitätswert führen kann. Die daraus resultierenden Schäden können sich jedoch je nach Kombination der Fließgeschwindigkeit und Fliesstiefe stark unterscheiden, je nach dem ob Fenster erreicht werden oder nicht. Dieses Problem kann durch folgendes Beispiel unter Vernachlässigung der Ablagerungshöhe illustriert werden:

Bei einer, in Abbildung 81 A dargestellten, hohen Fließgeschwindigkeit von 4 m/s und einer Fliesstiefe von 0.55 m ergibt sich bei der Multiplikation $v \cdot h$ ein Intensitätswert von $2.2 \text{ m}^2/\text{s}$ für starke Intensität gemäss Loat und Petraschek (1997). Durch die geringe Wassertiefe von 0.55 m würden die meisten Fenster in einer Höhe von 1 m (Totschnig und Fuchs, 2012) nicht erreicht. Da das Mauerwerk als weiteres Element der Gebäudehülle aber wie behandelt weitaus robuster als die Fenster ist, gelangt kein Wasser direkt durch eine grössere Gebäudeöffnung ins Innere.

Bei einer geringeren Fließgeschwindigkeit von 2 m/s und einer Wassertiefe von 1.1 m (Abbildung 81 B) ergibt sich wie im obigen Beispiel aus $v \cdot h$ ein Wert von ebenfalls $2.2 \text{ m}^2/\text{s}$, was ebenfalls zur Zuordnung einer starken Intensität nach Loat und Petraschek (1997) führt. Aufgrund der grösseren Fliesstiefe im Vergleich zum obigen Beispiel werden nun die meisten Fenster im Erdgeschoss unabhängig von der Ablagerungshöhe aber erreicht. Potentiell kann es nun zur Zerstörung der Fenster kommen, was zu einem grossflächigen Eindringen des Wassers ins Gebäude und höheren Schäden führt, obwohl für beide Fälle aufgrund des $v \cdot h$ -Wertes von $2.2 \text{ m}^2/\text{s}$ der gleichen Intensitätsklasse zugeordnet wurden.

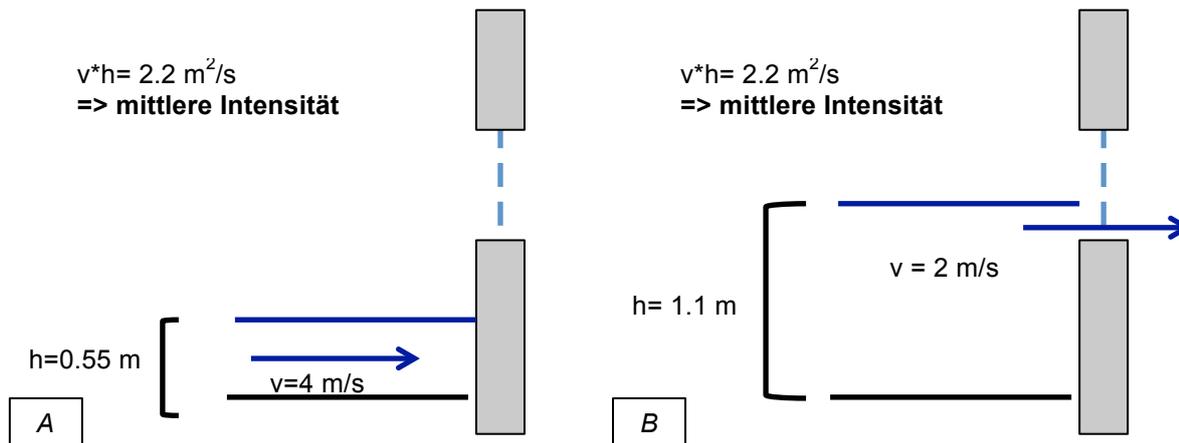


Abbildung 81: Wie in A und B ersichtlich, kann man beim $v \cdot h$ -Kriterium trotz unterschiedlichen Fliesstiefen und -geschwindigkeiten in beiden Fällen auf die gleiche Intensität kommen.

Ausserdem berücksichtigt der Faktor der Fliesstiefe wie am Beispiel von Gebäude Nr. 3 ersichtlich die Ablagerungshöhe nicht. Diese ist jedoch wie behandelt wichtig für die Wirkungshöhe und die Schadenentstehung.

Zusammenfassend konnten somit für das Kriterium $v \cdot h$ folgende Limitationen identifiziert werden:

- Die Klassengrenzen sind primär auf die menschliche Gefährdung ausgerichtet und wieder spiegeln den Zusammenhang aus Prozessintensität und Schadenempfindlichkeit nicht optimal.
- Die Bedeutung der Ablagerungshöhe im Zusammenhang mit der effektiven Wirkungshöhe des Prozesses und das sich daraus ergebende im Zusammenspiel mit Gebäudeöffnungen wird nicht berücksichtigt.
- Verknüpfung der beiden Faktoren Fliesstiefe und -geschwindigkeit durch die Multiplikation ist problematisch, da Gebäude, die aufgrund von sich unterscheidenden Fliesstiefen und Fließgeschwindigkeiten unterschiedliche Einwirkungen erfahren haben, potentiell der gleichen Intensitätsklasse zugeordnet werden könnten.

Auf Schwächen des in dieser Arbeit entwickelten Klassierungssystems (effektive Wirkungshöhe/Fließgeschwindigkeit) wird im Kapitel 7.6 eingegangen.

7.4 Physische Vulnerabilität

Bei der Diskussion der physischen Vulnerabilität werden zunächst die bestimmten Medianwerte der physischen Vulnerabilität mit den Ergebnissen aus anderen Studien verglichen. In 7.4.2 wird dann unter anderem das Streuverhalten der Schadenempfindlichkeitswerte im Bereich zwischen 0.5 m und 1 m effektiver Wirkungshöhe diskutiert.

7.4.1 Physische Vulnerabilitätswerte

Grundsätzlich lässt sich bei den 20 untersuchten Wohngebäuden in Baltschieder sowohl beim auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit wie auch beim auf $v \cdot h$ beruhenden Klassierungssystem eine Tendenz zur Zunahme der Schadenempfindlichkeits-Medianwerte mit zunehmender Prozessintensität beobachten. Die hergeleitete physische Vulnerabilität der Wohngebäude in Baltschieder scheint also von der Prozessintensität abhängig zu sein. Dies bestätigt das unter anderem von UNDRO (1979), Fell und Hartford (1997) und Papatoma-Köhle et al. (2012a), zitierte Axiom der Abhängigkeit zwischen Schadenempfindlichkeit und Prozessintensität.

Die gefundenen Medianwerte pro Intensitätsklasse für das $v \cdot h$ Intensitätskriterium und das Kriterium effektive Wirkungshöhe/Fliessgeschwindigkeit sind für die schwache Intensitätsklasse mit 0.02 beziehungsweise 0.03 sehr ähnlich oder gar identisch zu den Werten in der Literatur. So geht sowohl Borter (1999b) als auch Romang (2004) für die schwache Intensitätsklasse von einem Wert von 0.02 aus. Auch in EconoMe wird dieser Wert für die physische Vulnerabilität von Einfamilienhäusern verwendet (BAFU, 2010) und kann durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie zusätzlich gestützt werden.

Auch der Schadenempfindlichkeitswert der mittleren Intensitätsklasse nach Loat und Petraschek (1997) ist mit 0.23 praktisch identisch mit den Werten aus Borter (1999b) von 0.15 und EconoMe (BAFU, 2010) von 0.20. Einzig bezüglich der Studie von Romang (2004), welche eine Schadenempfindlichkeit in dieser Intensitätsklasse von 0.04 aufweist, unterscheidet sich der gefundene Wert erheblich.

Zu den grössten Abweichungen im Vergleich zu anderen Studien kommt es in der $v \cdot h$ -Intensitätsklasse stark. Hier konnte für die Fallstudie in Baltschieder ein Wert von 0.58 ermittelt werden, während dem Borter (1999b); Romang (2004) und EconoMe (BAFU, 2010) mit 0.30 beziehungsweise 0.18 klar tiefere Vulnerabilitätswerte ausweisen. Hier muss hinzugefügt werden, dass in der vorliegenden Fallstudie aus Baltschieder nur 3 der untersuchten Wohngebäude einer starken Intensität ausgesetzt waren. Die Aussagekraft des Vulnerabilitätswertes in der starken Intensitätsklasse ist damit unter Vorbehalt zu betrachten.

Eine Gegenüberstellung der Medianwerte des auf effektiver Wirkungshöhe und Fliessgeschwindigkeit basierenden Klassierungssystems ist nicht sinnvoll, da sich die angewendeten Klassengrenzen deutlich von denjenigen der anderen Studien unterscheidet. Der hergeleitete Medianwert für die physische Vulnerabilität der mittleren Intensitätsklasse (effektive Wirkungshöhen > 1 m und 1 m/s Fliessgeschwindigkeit) von 0.53 ist zudem unter einem gewissen Vorbehalt zu betrachten, da beim Ereignis in Baltschieder nur 6 Gebäude eine Einwirkung mittlerer Intensität erfuhren.

Im Vergleich zum Intensitätskriterium $v \cdot h$ scheint die effektive Wirkungshöhe aber wie in Abbildung 60 ersichtlich den Zusammenhang zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit besser zu beschreiben. Es ist relativ deutlich ein positiver Trend von zunehmender Schadenempfindlichkeit bei höherer Intensität ersichtlich. Die effektive Wirkungshöhe scheint die Schadenentstehung besser abzubilden und führt deshalb zu diesem klareren Trend.

7.4.2 Streuverhalten der physischen Vulnerabilität

Wie erkannt wurde (Abbildung 67), nimmt die Streuung der Schadenempfindlichkeit bei beiden verwendeten Intensitätskriterien mit zunehmender Intensität von der Klasse schwach zu stark tendenziell zu. Dieses Verhalten konnte ebenfalls von Fuchs und Heiss (2008) in ihrer Vulnerabilitätsanalyse beobachtet werden.

Während das Intensitätskriterium $v \cdot h$ jedoch einen fortlaufenden Anstieg der Streuung über alle drei Intensitätsklassen aufweist, ist beim neu entwickelten Kriterium der effektiven Wirkungshöhe wahrscheinlich von einer vergleichsweise geringeren Streuung in der Intensitätsklasse stark auszugehen. Ab einer effektiven Wirkungshöhe von 3.65 m der Intensitätsklasse stark ist bei einem zweistöckigen Einfamilienhaus nämlich mit einer Schadenempfindlichkeit von annähernd 1, also einem Totalschaden zu rechnen. Die Streuung für die starke Intensitätsklasse würde dementsprechend abnehmen, da die meisten von starker Intensität betroffenen Wohngebäude sehr hohe Schadenempfindlichkeiten aufweisen würden.

Neben der verminderten Streuung wären Schadenempfindlichkeiten um 1 für die starke Intensitätsklasse noch aus einem anderen Grund sinnvoll: Die Schadenempfindlichkeit wird wie bereits definiert als ein Wert zwischen 0 (kein Schaden) und 1 (Totalschaden) charakterisiert. Um dieser Definition gerecht zu werden und gleichzeitig zu einer geringeren Streuung innerhalb der Klassen beizutragen, sollte der Schadenempfindlichkeitswert in der schwachen Intensitätsklasse möglichst gering und in der starken Intensitätsklasse möglichst nahe an 1 sein. Diese Vorgabe scheint bei den auf effektiver Wirkungshöhe basierenden Intensitätsklassen zumindest für die Intensitätsklassen schwach und mittel relativ gut erfüllt zu sein. So beträgt der Medianwert der physischen Vulnerabilität für die schwache Intensitätsklasse 0.03 und für die mittlere Intensitätsklasse 0.53. Da jedoch keine Gebäude einer effektiven Wirkungshöhe von > 3.65 m ausgesetzt waren, konnte diese These am Fallbeispiel von Baltzrieder nicht für die starke Intensitätsklasse überprüft werden.

Gemäss der Abbildung 82 ist bei der vorliegenden Fallstudie die grösste Streuung der Schadenempfindlichkeit im Bereich zwischen 0.5 m und 1 m effektiver Wirkungshöhe auszumachen. In anderen auf Ablagerungshöhen basierenden Studien wie beispielsweise Totschnig und Fuchs (2012) wird der Bereich der maximalen Streuung der Schadenempfindlichkeit meist mit 1 m – 1.5 m angegeben und mit der Präsenz von Fenstern erklärt. Über den Bereich zwischen 1 m und 1.5 m können in dieser Masterarbeit keine relevanten Aussagen gemacht werden, da nur 2 Datenpunkte dieses Intensitätsintervall abdecken. Es ist aber denkbar, dass auch hier die Streuung am grössten wäre. Nachfolgend werden mögliche Gründe für die Streuung im Bereich zwischen 0.5 und 1 m effektiver Wirkungshöhe diskutiert.

Schadenempfindlichkeit vs effektive Wirkungshöhe

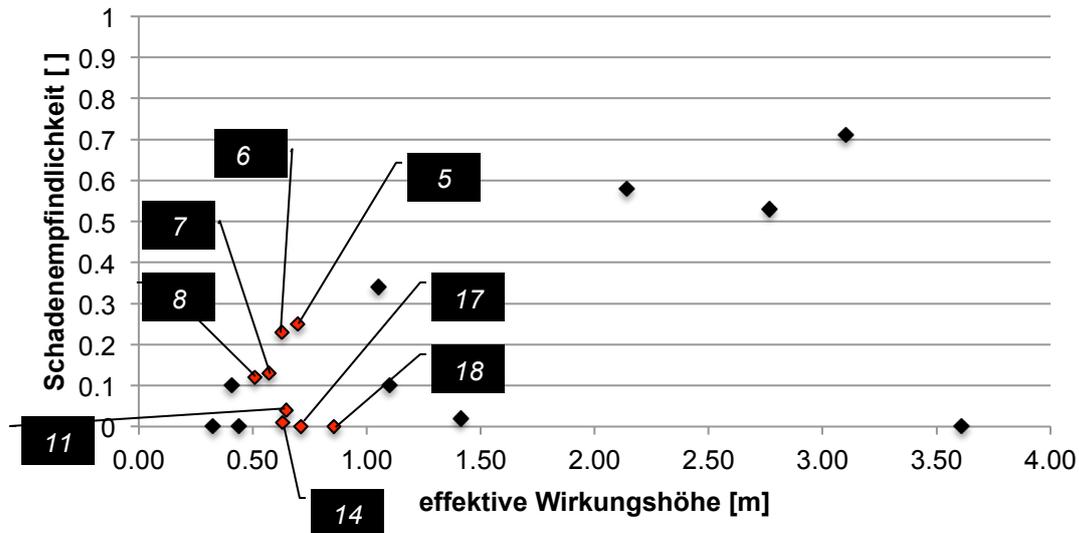


Abbildung 82: Effektive Wirkungshöhe vs. Schadenempfindlichkeit mit den bezüglich des Streuverhaltens untersuchten Datenpunkten in rot markiert. Die Nummern beziehen sich auf die Wohngebäude in Abbildung 49.

Bei genauerer Analyse der in Abbildung 82 rot markierten Gebäude zeigt sich, dass die Anzahl und Lage von Gebäudeöffnungen für diesen Intensitätsbereich Einfluss auf die Schadenempfindlichkeit zu nehmen scheinen und dies ein möglicher Grund für das Streuverhalten sein könnte. Verdeutlicht wird dies an den beiden Wohngebäuden Nr. 14 und Nr. 6. Beide Gebäude waren von einer effektiven Wirkungshöhe von rund 0.60 m betroffen, die Schadenempfindlichkeit von Gebäude Nr. 14 lag mit 0.01 jedoch 23 Mal tiefer als diejenige von Gebäude Nr. 6 mit 0.23. Als möglicher Grund hierfür können wie gesagt die Gebäudeöffnungen in Anströmrichtung der Überschwemmung angeführt werden. Weist Gebäude Nr. 6 (Abbildung 83 A) im direkten Vergleich zu Gebäude Nr. 14 (Abbildung 83 B) doch eine wesentlich höhere Anzahl Gebäudeöffnungen im simulierten effektiven Wirkungsbereich der Überschwemmung auf. Sowohl die Doppel- und Einzelgaragentüren als auch die zwei Zugangstüren bei Gebäude Nr. 6 wurden entsprechend der berechneten effektiven Wirkungshöhe angeströmt. Die beiden Fenster lagen oberhalb der berechneten effektiven Wirkungshöhe und erfuhren dadurch keine direkte Einwirkung durch die dynamische Überschwemmung. Im Vergleich dazu gibt es bei Gebäude Nr. 14 auf der angeströmten Gebäudeseite keine Gebäudeöffnungen, welche vom Ereignis direkt betroffen waren, da die beiden kleinen Fenster als einzige Gebäudeöffnungen höher als 0.60 m über dem Boden liegen. Während bei Gebäude Nr. 6 also Wasser über 4 Gebäudeöffnungen ins Innere eindringen konnte, gab es bei Gebäude Nr. 14 keine derartigen Öffnungen in der Anströmrichtung des Ereignisses.

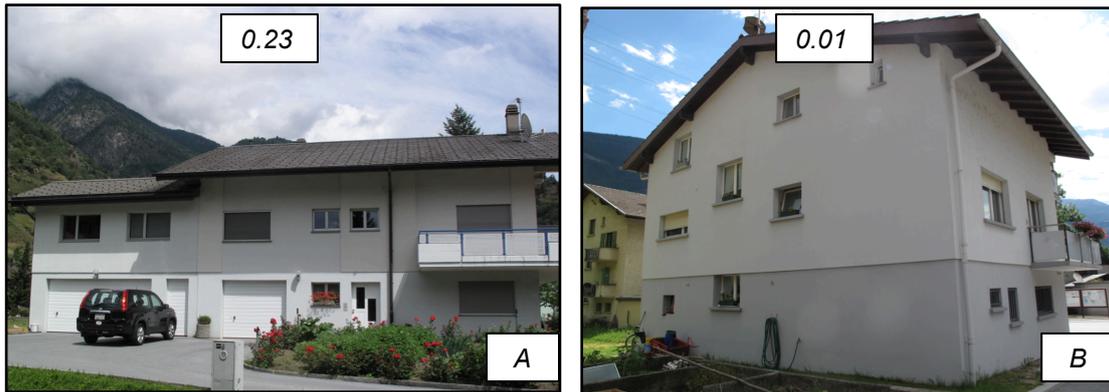


Abbildung 83: Angeströmte Gebäudeseiten von Wohngebäude Nr. 6 (A) und Nr. 14 (B) im direkten Vergleich. Die entsprechende Schadenempfindlichkeit der beiden Gebäude ist jeweils in der weissen Textbox vermerkt.

Da die Prozessintensität für beide Gebäude praktisch identisch gewesen ist, kann der Unterschied bezüglich der Schadenempfindlichkeit wahrscheinlich durch objektspezifische Eigenschaften wie die besprochene Anzahl und Lage der Gebäudeöffnungen erklärt werden. Dabei ist die Lage der Gebäudeöffnung in der Fassade entscheidend dafür, ob die Gebäudeöffnung aufgrund der effektiven Wirkungshöhe der Überschwemmung erreicht wird oder nicht. Ist dies der Fall, so ist gemäss Kimmerle (2002) die Wahrscheinlichkeit des Eindringens von Wasser und der Schadenentstehung im Inneren sehr hoch.

Die anhand von Abbildung 83 besprochene Individualität der Gebäude bezüglich der Gebäudeöffnungen spielt in Bezug auf das Streuverhalten und die Herleitung von Vulnerabilitätswerten eine zentrale Rolle. Die Schadenempfindlichkeitswerte und damit die physische Vulnerabilität werden neben der Prozessintensität auch noch von Objektseite her beeinflusst.

Ein weiterer möglicher Grund für die in Abbildung 82 gezeigte Streuung der Schadenempfindlichkeit zwischen 0.5 m und 1 m effektiver Wirkungshöhe könnte aber auch die fehlende Differenzierung zwischen dynamischer und statischer Überschwemmung sein. Wie in Tabelle 26 aufgeführt, waren nämlich mit Ausnahme von Gebäude Nr. 8 alle Gebäude mit einer Schadenempfindlichkeit > 0.1 im Intensitätsintervall zwischen 0.5 m und 1 m effektiver Wirkungshöhe zum Zeitpunkt der maximalen effektiven Wirkungshöhe von Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s betroffen. Gebäude Nr. 8 war dabei über die gesamte Ereignisdauer gesehen auch Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s ausgesetzt.

Im Gegensatz dazu wirkte auf die 5 betroffenen Gebäude mit Schadenempfindlichkeit < 0.1 im selben Intensitätsintervall zum Zeitpunkt der effektiven Wirkungshöhe Fließgeschwindigkeiten < 1 m/s ein. In den detaillierten Simulationsergebnissen in der beigefügten Daten-CD zeigt sich sogar, dass auf diese Gebäude während des gesamten Ereignisses nie Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s einwirkten. Einzige Ausnahme stellt dabei Gebäude Nr. 14 dar, welches gemäss Simulation für einen kurzen Zeitschritt mit einer Fließgeschwindigkeit leicht über 1 m/s angeströmt wurde. Dies legt die Vermutung nahe, dass Gebäude auf dynamische Überschwemmungen vulnerabler reagieren als auf statische. Gleichzeitig wird dadurch die Bedeutung des Einbezugs der Fließgeschwindigkeit bei der Klassenzuordnung unterstrichen. Da beim neu entwickelten Klassierungssystem ebenfalls Wohngebäude im Einflussbereich von eher statischen Überschwemmungen miteinbezogen wurden, könnte dies mitverantwortlich für die Streuung der Datenpunkte bei Wirkungshöhen < 1 m effektiver Wirkungshöhe sein.

Tabelle 26: Gegenüberstellung der Fliessgeschwindigkeiten der Gebäude im Intensitätsintervall 0.5 m – 1 m effektiver Wirkungshöhe. S* bezeichnet die einzelnen Schadenempfindlichkeitswerte der Gebäude, v die Fliessgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der maximalen effektiven Wirkungshöhe.

Schadenempfindlichkeit > 0.1					Schadenempfindlichkeit < 0.1				
Nr.	5	6	7	8	Nr.	11	14	17	18
S*	0.25	0.23	0.13	0.12	S*	0.04	0.01	0.00	0.00
v	1.45	1.34	1.15	0.08	v	0.34	0.70	0.15	0.83

7.5 Objekt- und Umgebungsparameter als Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität

Beim Vergleich der objektspezifischen Charakteristika der Gebäude mit Schadenempfindlichkeits-Extrema in der schwachen Intensitätsklasse (Kapitel 6.6.1) stellte das Vorhandensein, die Lage und die Art der Gebäudeöffnungen einen klar ersichtlichen Unterschied zwischen Gebäuden mit maximaler und minimaler Schadenempfindlichkeit dar. Im Gegensatz zu Gebäude Nr. 5 gab es bei den Gebäuden mit Minima bezüglich Schadenempfindlichkeit im Erdgeschoss keine grossflächigen Fensterfronten oder -türen. Im Fall von Gebäude Nr. 19 lagen sogar gar keine Gebäudeöffnungen in direkter Anströmrichtung vor. Wenn trotzdem Gebäudeöffnungen in Anströmrichtung vorhanden waren, handelte es sich um kleine Fenster (Nr. 20), erhöhte Eingangstüren (Nr. 17 und Nr. 20) oder Garagentore (Nr. 15, Nr. 18, Nr. 20).

Da die Scheiben der grossflächigen Fenstertüren von Gebäude Nr. 5 bis auf das Niveau der Terrainoberfläche reichen, waren sie auch bei den geringen effektiven Wirkungshöhen von < 1 m im Wirkungsbereich der Überschwemmung. Gleichzeitig boten die grossen Scheiben vergleichsweise eine grössere Angriffsfläche für eindringendes Wasser und Feststoffe, was schliesslich unter anderem ebenfalls zur entsprechend höheren Schadenempfindlichkeit beigetragen haben mag. Gebäudeöffnungen scheinen also in der schwachen Intensitätsklasse bei den untersuchten Gebäuden in Baltschieder aufgrund ihrer Wassergängigkeit direkt einen Einfluss auf die Höhe der Schadenempfindlichkeit und damit die physische Vulnerabilität genommen zu haben.

Als weiterer Unterschied zwischen den beiden Gebäudegruppen kann im Rahmen dieser Fallstudie in Baltschieder die Art der Wohnnutzung des Erdgeschosses angegeben werden. Es ist auffallend, dass in allen 5 Wohngebäuden mit einer Schadenempfindlichkeit von 0.00 (Nr. 15, Nr. 17, Nr. 18, Nr. 19 und Nr. 20) das Erdgeschoss zumindest nicht komplett als Wohnfläche genutzt wird. Bei allen 5 Gebäuden scheint wenigstens in einem Teil des Erdgeschosses mindestens eine Garage untergebracht zu sein. Eine Wohnnutzung kann bei den 5 Gebäuden aufgrund der wenigen Fenster praktisch ausgeschlossen werden, weitere Räume mit sanitären Anlagen oder Waschküchen und Hobbyräume sind denkbar. Dies könnte einerseits ein Zeichen dafür sein, dass Räume mit Wohnnutzungen im direkten Vergleich vulnerabler sind als Nicht-Wohnräume. Diese Vermutung ist naheliegend, da Wände in Nicht-Wohnräumen oft nicht verputzt sind und Böden meist nicht aus vulnerablen Materialien wie Parkett oder Teppich bestehen. Dies erlaubt selbst beim Eindringen von Wasser einen relativ schadlosen Ablauf des Ereignisses. Ausserdem ist der Ausbaustandard in Nicht-Wohnräumen wie Garagen in der Regel sicherlich geringer als bei Wohnräumen, was allfällig trotzdem entstehende Schäden an Boden und Wänden natürlich reduziert.

Der Einfluss von Umgebungsparametern wie Vegetation oder Zäune vor den Gebäuden, war beim Vergleich der Gebäude mit Schadenempfindlichkeits-Extremwerten der schwachen Intensitätsklasse nicht deutlich zu erkennen. Einerseits ist es im Fall der gepflanzten Büsche vor Gebäude Nr. 5 eher unwahrscheinlich, dass der Ist-Zustand auch dem Zustand zum Ereigniszeitpunkt vor bald 14 Jahren

entspricht. Falls die Büsche damals bereits vorhanden waren und das Ereignis überstanden haben, wiesen sie sicherlich geringere Wuchshöhen auf. Dies hätte die abbremsende und abschirmende Wirkung der Büsche auf das anströmende Wasser-Feststoffgemisch der Überschwemmung sicherlich vermindert. Auch bei den identifizierten Holz- (Nr. 20) und Stahlzäunen (Nr. 17, Nr. 5) kann keine Tendenz zur Beeinflussung der physischen Vulnerabilität ausgemacht werden. So kommen diese Zäune sowohl bei Gebäuden mit Minimalwerten (Nr. 20, Nr. 17) als auch bei Gebäuden mit dem Maximalwert der Schadenempfindlichkeit vor. Es ist denkbar, dass die Zäune in diesem Intensitätsbereich zwar anströmendes Geschiebe und Schwemmholz zum Teil zurückgehalten haben, das Wasser aber trotzdem mehr oder weniger ungehindert anströmen konnte.

Auch beim Vergleich der beiden Gebäude mit Schadenempfindlichkeits-Extremwerten der mittleren Intensitätsklasse zeigt sich kein klarer Einfluss von Umgebungsparametern auf die physische Vulnerabilität. Aber auch hier wird klar, dass Gebäudeöffnungen einer der augenfälligsten Unterschiede zwischen den beiden Gebäudehüllen darstellen. So hat Gebäude Nr. 1 mit der grössten Schadenempfindlichkeit beispielsweise 2 grossflächige Fenster und 3 Lüftungsschächte auf Geländeneiveau. Die Lüftungsschächte zusammen mit der seitlich angebrachten Zugangstreppe ins Untergeschoss führten dazu, dass neben dem Erdgeschoss ein weiteres Geschoss durch das Eindringen von Wasser und Feststoffen betroffen war. Dies erhöht natürlich den Schaden auch bei einer Nicht-Wohnraumnutzung des Untergeschosses. Vor allem vor dem Hintergrund, dass Fenster unter Lüftungsschächten im Untergeschoss zu Lüftungszwecken häufig nicht geschlossen sind (Kimmerle, 2002) und Wasser so ungehindert eindringen kann.

Beim Gebäude Nr. 16 hingegen gab es kein Untergeschoss und das Erdgeschoss wurde nicht zum Wohnen genutzt. Ausserdem ist davon auszugehen, dass die Türe als auch das Garagentor aus Holz im Erdgeschoss weniger vulnerabel auf Feststoffanprall reagiert haben als die grossen Fenster von Gebäude Nr. 1. Das kleine Fenster von Gebäude Nr. 16 ging während des Ereignisses unter Umständen auch nicht zu Bruch, da beispielsweise die Wahrscheinlichkeit eines Feststoffanpralls begründet durch die kleine Fläche gering war. Somit ist es denkbar, dass bei Wohngebäude Nr. 16 keine grösseren Mengen von Feststoffen und Wasser ins Erdgeschoss eindrangen. Das Erdgeschoss war zudem nicht zum Wohnen genutzt, was einen geringeren Ausbaustandard und weniger vulnerable Bausubstanzen (beispielsweise kein Teppichboden) vermuten lässt. In Kombination führten diese Faktoren zu der beobachteten minimalen Schadenempfindlichkeit.

Es kann also festgehalten werden, dass die Lage und Art von Gebäudeöffnungen in beiden Intensitätsklassen vermutlich die Schadenempfindlichkeit der Gebäude beim Ereignis in Baltschieder beeinflusst haben. Dies würde sich mit den in 7.4.2 beschriebenen möglichen Ursachen für das Streuverhalten der Daten zwischen 0.50 m und 1.00 m effektiver Wirkungshöhe decken und den Ergebnissen der Studie von Spichtig und Bründl (2008) entsprechen. Ein weiterer wichtiger Objektparameter scheint die Nutzung des Erdgeschosses zu sein. Diese Beobachtungen werden ausserdem ebenfalls durch die Studien von Birkmann (2006) oder Spichtig und Bründl (2008) bestätigt, die davon ausgehen, dass sowohl Gebäudeöffnungen als auch die Nutzung des Erdgeschosses zentrale Indikatoren für die physische Vulnerabilität darstellen.

Innerhalb der gleichen Intensitätsklasse kann der Einfluss der Prozessintensität auf die physische Vulnerabilität aufgrund der Klassierung vernachlässigt werden. Umso mehr wird die Bedeutung von Objektparametern bezüglich der physischen Vulnerabilität unterstrichen. Aufgrund ihrer Heterogenität tragen diese Objektparameter zur Ausbildung von Extremwerten in den einzelnen Intensitätsklassen bei. Die individuelle Bauweise von Wohngebäuden und die damit einhergehende Heterogenität der Gebäude in Bezug auf die Gebäudehülle und die Nutzungsart stellen somit per se eine wichtige Einflussgrösse auf die physische Vulnerabilität dar. Dies wird unter anderem bei Betrachtung der Lage

der Fenster deutlich: Denn die Höhe der Fenster und Gebäudeöffnungen in der Gebäudehülle, entscheidet in Kombination mit der Wirkungshöhe der Überschwemmung darüber, ob Wasser eindringt oder nicht.

Grundsätzlich sind alle Objektparameter, welche Wasser und Feststoffe daran hindern ins Gebäudeinnere zu gelangen oder den dort entstehenden Schaden verringern wichtige Faktoren für die Senkung der physischen Vulnerabilität. Dies vor allem vor dem von Choffet (2013) dargelegten Hintergrund, dass bereits die ersten 20 cm Wasser im Gebäudeinneren zu einem starken Anstieg des Schadens führen können.

Ein dominanter Einfluss von in der Literatur aufgeführten Umgebungsparametern wie Vegetation oder Schutzmassnahmen (Papathoma-Köhle et al., 2011) konnten im Rahmen des durchgeführten Vergleichs der Extrema in jeder Intensitätsklasse nicht beobachtet werden. Die ebenfalls vielfach angesprochene erhöhte Lage eines Gebäudes wird in der vorliegenden Arbeit bereits in der Berechnung der Intensität berücksichtigt, da Erhöhungen von 50 cm im DHM erfasst sind.

Ein Objektschutz gegen feststoffführende Überschwemmungen kann nach Anfrage beim damaligen die Evakuierung leitende Feuerwehrkommandanten beim Ereignis in Baltschieder bei den untersuchten Gebäuden praktisch ausgeschlossen werden. Die Vorwarnzeit für die Leute war zu kurz um Sandsäcke oder ähnliches zu platzieren (Nellen, 2014).

7.5.1 Eine an feststoffführende, dynamische Überschwemmungen angepasste Bauweise

Die in dieser und anderen Fallstudien erlangten Erkenntnisse in Bezug auf Einflussparameter auf die physische Vulnerabilität könnten nach weiterer Validierung wichtige Impulse für das naturgefahrenrechte Bauen in der Zukunft geben. Ein Ideal auf die Einwirkungen einer dynamischen, feststoffführenden Überschwemmung mit schwacher Intensität ausgerichtetes Haus würde basierend auf den oben identifizierten und bestätigten Objektparameter folgende Eigenschaften aufweisen:

- Gebäudeöffnungen wie Eingangstüren, Garagenzufahrten und Fenster im Erdgeschoss sind stark erhöht einzuplanen.
- Gebäudeöffnungen an der Fassade in potentieller Anströmrichtung sind auf ein notwendiges Minimum zu begrenzen.
- Auf den Einbau von grossflächigen Fenstertüren im Erdgeschoss ist zu verzichten.
- Auf ein Untergeschoss mit entsprechenden Zugängen und Licht- beziehungsweise Lüftungsschächten ist zu verzichten.
- Das Erdgeschoss sollte nicht als Wohnraum genutzt werden und ist mit möglichst überschwemmungstauglichen Baustoffen (keine Teppiche, Parkett) auszustatten.

Wie die Ergebnisse dieser und anderer Fallstudien vermuten lassen, liesse sich die physische Vulnerabilität durch die beschriebenen Massnahmen vermutlich vor allem in der schwachen Intensitätsklasse bedeutend senken. Es ist beispielsweise anzunehmen, dass die Schadenempfindlichkeit des Wohngebäudes Nr. 5 von 0.25 durch derartige Massnahmen minimiert werden könnte. Die Umsetzung der naturgefahren-gerechten Bauweise für schwache Intensitätsklassen würde wiederum wenig

Mehrkosten generieren, wenn sie bereits in der Planungsphase mit Architekten, Ingenieuren und Naturgefahrenfachleuten konzipiert würden.

Für Intensitäten der mittleren und starken Klasse wäre eine objektbezogene Sicherung gegenüber den Einwirkungen einer dynamischen Überschwemmung wohl aufgrund der grossen Energien und Wirkungshöhen technisch eher schwierig umzusetzen und ökonomisch nicht sinnvoll. Dennoch würden natürlich auch hier die Massnahmen für die schwache Intensitätsklasse eine tendenziell gesenkte physische Vulnerabilität zur Folge haben. Massnahmen wie die Nicht-Wohnnutzung des Erdgeschosses würden hier ebenfalls ihre Wirkung zeigen. Dennoch ist für derartige Intensitäten wohl auch in Zukunft die Prämisse, es durch technischen Flächenschutz wie Geschieberückhaltebecken gar nicht erst zu einer Einwirkung auf das Gebäude kommen zu lassen.

7.6 Methode zur Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT

Die im Rahmen dieser Vulnerabilitätsanalyse in Baltschieder entwickelte Methode konnte auch gleichzeitig an ihr angewendet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Rekonstruktion des Ereignisses mit Hilfe der BASEMENT-Simulation ein geeignetes Tool ist, um Intensitätskriterien wie Fliesstiefe oder -geschwindigkeit dynamisch über die gesamte Dauer eines Ereignisses zu bestimmen und für die Vulnerabilitätsanalyse zu verwenden. Weiter konnte ein auf Schadensverursachung basierendes Klassierungssystem erstmals angewendet und Versicherungsdaten in die Analyse implementiert werden. Die gesamte Methode ist grundsätzlich für alle Arten von versicherten Gebäudetypen anwendbar.

Nachfolgend werden die Simulation, Kalibrierung, Zuordnung zu den Intensitätsklassen und die Bestimmung der Schadenempfindlichkeit als Einzelschritte der entwickelten Methode kurz diskutiert. Es wird dabei unter anderem jeweils auf Limitationen im Zusammenhang mit der Anwendung der Methode eingegangen.

7.6.1 Simulation

In der vorliegenden Fallstudie gestaltete sich die Generierung des Berechnungsgitters als Vorbereitung auf die Simulation als sehr aufwändig. Hauptgrund hierfür war der Katasterplan, der vom Geometerbüro zur Verfügung gestellt wurde. Beim Katasterplan der Gemeinde Baltschieder waren Parzellengrenzen, Gebäudeumrisse, Mauern, Strassen und Bürgersteige nur auf einem einzigen Layer verfügbar. Da jedoch nur Gebäudeumrisse und Strassenverläufe für die eigentliche Simulation verwendet wurden, bedingte dies das aufwändige manuelle Löschen aller nicht benötigten Elemente. Um den Zeitaufwand für künftige Studien zu reduzieren, sollte deshalb zwingend darauf geachtet werden, dass Gebäudeumrisse und Strassen auf separaten Layern vorhanden sind. Eine Zusammenführung auf einen Layer kann dann in GIS einfach bewerkstelligt und für die weitere Gittergenerierung verwendet werden.

Gebäudeumrisse nehmen aufgrund der späteren Aussparung der Gebäude im Berechnungsgitter wesentlich Einfluss auf die Fliesswege der Simulation. Es sollte deshalb darauf geachtet werden, dass der Katasterplan wenn möglich den Stand der Dinge zum Ereigniszeitpunkt abbildet. Hier wären bei der Fallstudie in Baltschieder sicherlich noch einige Verbesserungen möglich.

Fliesswege hängen des Weiteren stark vom Geländeverlauf ab. Es ist deshalb unbedingt darauf zu achten, dass das verwendete DHM ebenfalls möglichst genau der Topographie zum Ereigniszeitpunkt entspricht. Wo kein DHM zum Ereigniszeitpunkt vorliegt, müssen beispielsweise nachträglich erstellte Dämme oder grosse Aufschüttungen vor der Simulation durch Anpassen der Topographie beseitigt werden. Die Topographie ist dabei so weit als möglich an den Ausgangszustand beim Ereigniszeitpunkt zurückzuführen. Da dieser aber nicht immer rekonstruierbar ist, stellt das für die Simulation verwendete DHM diesbezüglich eine gewisse Unsicherheitsquelle dar. In der Fallstudie in Baltschieder könnten hier wie besprochen im Bereich vor Gebäude Nr. 1 sicherlich noch Anpassungen vorgenommen werden, um das Simulationsergebnis zu verbessern.

Die grössten Unsicherheiten bei der Simulation liegen in den beiden Inputdatensätzen der Abfluss- und der Geschiebeganglinie. Diese beruhen nicht auf direkt gemessenen Daten, sondern wurden wie dargelegt über Niederschlagsmessungen und eine empirische Formel hergeleitet. Da Messstationen des Abflusses und des Geschiebeganges meist nicht vorhanden und bei einem derartigen Ereignis wahrscheinlich ohnehin zerstört würden, lässt sich diese Unsicherheit praktisch nicht vermeiden. Die Simulation an sich ist nicht als exakte Nachbildung der Realität zu sehen, sondern eher als ein vereinfachtes Modell davon. Umso wichtiger erscheint in diesem Zusammenhang die nachfolgend diskutierte Kalibrierung der Ergebnisse.

7.6.2 Kalibrierung

Da die Kalibrierung hauptsächlich mit Hilfe von Photos der Ablagerungshöhen durchgeführt wurde, bestimmen, wie bereits Papahtoma-Köhle et al. (2012a) erkannten, die Qualität, der Aufnahmewinkel und die Menge an Photos die Genauigkeit der Intensitätsbestimmung wesentlich mit. Wie besprochen fehlt in Baltschieder vor allem im vom Kegelhals weiter entferntem Bereich entsprechendes Bildmaterial, weshalb die Ergebnisse in diesem Bereich auch mit grösserer Unsicherheit behaftet sind. Die Kalibrierungsdaten könnten in zukünftigen Studien durch systematische Befragungen von Einwohnern und Feuerwehr oder Videomaterial erweitert werden, um derartige Unsicherheiten zu minimieren. Des Weiteren könnte die Kalibrierungsgrundlage zukünftig ebenfalls verbessert werden, indem Daten zu Ablagerungshöhen direkt nach dem Ereignis systematisch von Naturgefahrenspezialisten für jedes betroffene Gebäude erhoben würden. Diese Daten könnten dann in StorMe (Ereigniskataster des Bundes) integriert werden. Allfällige Erhebungsformulare und Methoden müssten an die schwierigen Bedingungen nach einem Ereignis (Gefährdung, Aufräumarbeiten etc.) angepasst werden, um ein möglichst effizientes Ausfüllen zu ermöglichen.

Wie das Beispiel von Gebäude Nr. 13 in dieser Studie gezeigt hat, sollten Wohngebäude mit einer Schadenempfindlichkeit > 0.00 nicht mehr als Kalibrierungsgrundlage verwendet werden. Es kann wie besprochen nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass am Standort der Versicherungspolice auch eine Prozesseinwirkung der dynamischen Überschwemmung stattgefunden hat.

Bei grösser angelegten Studien würde es sich zudem empfehlen, vorab eine Sensitivitätsanalyse jeder verwendeten Simulationseinstellung vorzunehmen. Dadurch könnte der Kalibrierungsprozess beschleunigt werden, da der Effekt von einzelnen Einstellungen auf das Simulationsergebnis besser bekannt wäre.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Kalibrierung anhand von Bildmaterial von Ablagerungshöhen insgesamt zu guten Resultaten führt.

7.6.3 Zuordnung zu den Intensitätsklassen

Die Zuordnung der untersuchten Wohngebäude zu den Intensitätsklassen wurde auf Grundlage eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Klassierungssystems durchgeführt, welches auf dem neu eingeführten Intensitätskriterium der effektiven Wirkungshöhe und der Fliessgeschwindigkeit basiert und der Schadenentstehung bei der Einwirkung gerecht werden soll. In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die beiden Intensitätskriterien und ihre Limitationen diskutiert.

7.6.3.1 Diskussion des Kriteriums effektive Wirkungshöhe

Das in dieser Arbeit verwendete Klassierungssystem beruht auf der Annahme, dass Fensterscheiben als vulnerabelstes Element der Gebäudehülle gegenüber dynamischen Überschwemmungen wesentlich für die Schadenentstehung verantwortlich sind. Im entwickelten Klassierungssystem ist es dabei entscheidend, ob die Fensterscheibe von der dynamischen Überschwemmung erreicht wird oder nicht. Aus diesem Grund wurde die Klassengrenze zwischen schwacher und mittlerer Intensität wie behandelt auf 1 m effektiver Wirkungshöhe festgesetzt.

Hier liegt eine der Hauptlimitationen des Klassierungssystems: Aufgrund der hohen Individualität der Gebäude unterscheidet sich die Lage der Fenster in der Fassade zum Teil stark. Dies führt dazu, dass beispielsweise mit einer gegebenen effektiven Wirkungshöhe bei einem Gebäude mit Fenstertüren bereits Wasser und Feststoffe über die Fensteröffnung eindringen, während dem bei einem Gebäude mit erhöht angebrachtem Fenster noch gar keine Prozesseinwirkung auf die Fensterscheibe stattfindet. Dies ist schliesslich mitunter einer der möglichen Gründe für das Streuverhalten der Schadenempfindlichkeitswerte innerhalb der Intensitätsklassen. Ausserdem werden durch das Klassierungssystem weitere klar schadensteuernde Objekteigenschaften wie etwa Lüftungsschächte nicht berücksichtigt.

Ein mögliches Problem, welches sich unter Umständen mit der definierten Klassengrenze zur starken Intensitätsklasse von > 3.65 m effektiver Wirkungshöhe ergeben könnte, ist der Fakt, dass derartige Prozessintensitäten mitunter wohl eher selten vorkommen. Dementsprechend hätte man auch wenige Schadenfälle in diesem Bereich, was die Herleitung eines robusten Vulnerabilitätswertes zusätzlich erschweren würde. Grundsätzlich ist aber in diesem Intensitätsbereich mit Ausnahme von objektbedingten Ausreissern mit einer Abnahme der Streuung zu rechnen, was die Bestimmung von robusten Kennzahlen der physischen Vulnerabilität wiederum erleichtern würde.

Ebenfalls mit Blick auf die effektive Wirkungshöhe bleibt festzuhalten, dass sich die dominante Art, Lage und Qualität von Fensteröffnungen über die Zeit auch verändern kann. Dies zeigt ein allgemeines Problem der vorgeschlagenen Methode auf: Vulnerabilitätswerte werden mit der vorliegenden Methode empirisch aus der Vergangenheit anhand von Fallstudien hergeleitet. Widerstandsfähigkeit und Bauweise der verbauten Fenster kann sich jedoch über die Zeit verändern. Bei der Anwendung heutiger Fensterfestigkeiten oder -bauarten kann dies zu falschen Schlüssen in Bezug auf die Vulnerabilität führen. Ein Klassierungssystem für eine Vulnerabilitätsanalyse sollte deshalb der dynamischer Charakteristik von Vulnerabilität gerecht werden, wie bereits Papathoma-Köhle et al. (2011) in ihrer Studie angemerkt haben.

7.6.3.2 Diskussion des Intensitätskriteriums Fliessgeschwindigkeit

Das neben der effektiven Wirkungshöhe angewendete Kriterium der Fliessgeschwindigkeit von mindestens 1 m/s scheint auf den ersten Blick für die Betrachtung von dynamischen Überschwemmungen redundant, da diese per Definition bereits Fliessgeschwindigkeiten von > 1 m/s aufweisen. Wie es beim Fallbeispiel in Baltschieder jedoch der Fall war, kann eine dynamische Überschwemmung vor allem in den lateralen Wirkungsbereichen ebenfalls statisch mit Fliessgeschwindigkeiten < 1 m/s verlaufen. Um die ohnehin bescheidene Stichprobe aus betroffenen Gebäuden nicht weiter zu verkleinern, war es deshalb wichtig mit Hilfe des Kriteriums der Fliessgeschwindigkeit, auch die Gebäude mit einer eher statischen Einwirkung in die Studie integrieren zu können.

Aufgrund der unterschiedlichen Prozesscharakteristik zwischen statischen und dynamischen Überschwemmungen trug dieses Vorgehen unter Umständen jedoch, wie am Beispiel der Intensitätsklasse schwach gesehen, zu der dort beobachteten Streuung bei. Ein Teil der Streuung der Schadenempfindlichkeitswerte in der Intensitätsklasse schwach wäre somit auf Gebäude in Bereiche mit statischer Überschwemmung zurückzuführen. Bei Fallstudien in welchen eine ausreichend grosse Zahl von Schadendaten zur Verfügung stehen, würde es sich in Zukunft deshalb empfehlen alle Gebäude im Bereich eher statischer Überschwemmungscharakteristik nicht für die Untersuchung der physischen Vulnerabilität gegenüber dynamischen Überschwemmungen zu verwenden und sich bei der Klassierung ausschliesslich auf die effektive Wirkungshöhe zu konzentrieren.

Zudem fehlt bisweilen eine saubere empirische Basis für die physikalische Widerstandsfähigkeit von Fensterscheiben gegenüber dynamischen Überschwemmungen. Dies führt zu einigen Unsicherheiten in Bezug auf die maximale Widerstandsfähigkeit von Fensterscheiben gegenüber den von der Fliess-tiefe und -geschwindigkeit abhängigen Einwirkungen und damit den diesbezüglich gesetzten Klassengrenzen.

7.6.4 Bestimmung der Schadenempfindlichkeit

Der von Spichtig und Bründl (2008) gewonnene Eindruck über die Schwierigkeit bei der Beschaffung von Versicherungsdaten zur Vulnerabilitätsanalyse kann im Rahmen dieser Masterarbeit bestätigt werden. In der Schweiz sind Gebäude in den 7 sogenannten GUSTAVO-Kantonen Genf, Uri, Schwyz, Tessin, Appenzell Innerrhoden, Wallis und Obwalden gegen Elementarschäden durch die private Assekuranz versichert. In den restlichen 19 Kantonen haben kantonale Gebäudeversicherungen das Monopol auf die Versicherung von Gebäuden gegenüber Elementarschäden (Wüthrich, 2011). In den 7 GUSTAVO - Kantonen spielt der freie Markt bei der Wahl des Versicherers. Dementsprechend sind bei einem Schadenereignis meistens jeweils eine Vielzahl von Gebäudeversicherungen betroffen. Dabei in diesen Kantonen umfassend an alle Daten der betroffenen Gebäude zu gelangen, um so eine möglichst grosse Stichprobe zu generieren, gestaltet sich als schwierig. Die Versicherungen stehen nämlich gegenüber einander in einem Konkurrenzverhältnis. Schadensinformationen oder Informationen zur Versicherungsdeckung können unter diesen Umständen deshalb mitunter nicht zugänglich machen, wenn andere Konkurrenzversicherungen am Projekt beteiligt sind.

Eine weitere Schwierigkeit im Umgang mit den Versicherungsdaten ist der Datenschutz, welcher den Zugang zu den Daten zusätzlich erschwert. Spichtig und Bründl (2008) stellten in ihrer Vulnerabilitätsanalyse zudem fest, dass eine die Zurückhaltung der Versicherungen Daten herauszugeben ausserdem mit „dem Aufwand der Bereitstellung und der Frage der Interpretierbarkeit“ begründet werden kann.

Als Lösung für die Problematik des Datenschutzes kann, wie in der vorliegenden Arbeit praktiziert, die Schadenempfindlichkeit direkt durch die Versicherung berechnet werden. So arbeitet der jeweilige Autor der Studie nicht direkt mit den aus Gründen des Datenschutzes sensiblen Daten des Gebäudewertes oder der Schadensumme.

Wichtig ist bei der Bestimmung der Schadenempfindlichkeit in diesem Zusammenhang, dass klar zwischen Schäden an der Gebäudehülle und der Fahrhabe unterschieden wird und ausschliesslich Schadendaten an der Gebäudehülle verwendet werden, wenn eine Aussage zur physischen Vulnerabilität der Gebäudestruktur getroffen werden soll.

Mögliche Unsicherheiten in Bezug auf die Bestimmung der lokalisierten Schadenempfindlichkeit in Baltschieder liegen in der exakten Lokalisierung der betroffenen Gebäude und der Versicherungspraxis. Die Daten wurden von der Mobiliar zwar mit grosser Sorgfalt rekonstruiert, dennoch lässt die Datenführung im Jahr 2000 und die Tatsache, dass in Baltschieder nicht flächendeckend Hausnummern eingeführt sind, keine absolute Exaktheit zu. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass der Ort an dem eine Versicherungspolice lokalisiert ist nicht dem Standort des betroffenen Gebäudes entspricht. Gebäude Nr. 13 könnte wie behandelt so einen Fall darstellen.

Weiter besteht bei Vulnerabilitätsanalysen auf Grundlage von Versicherungsdaten eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Schadenssummen, auf welchen die Schadenempfindlichkeit beruht. Aus Kulanz der Versicherungen kann nämlich im Einzelfall nicht ausgeschlossen werden, dass eigentlich nicht gedeckte Schäden übernommen werden (Fuchs und Heiss, 2008). Dies führt dann zu einer Überschätzung der physischen Vulnerabilität. Zudem ist es aber auch denkbar, dass wegen ungenügender Deckung weniger Schaden erstattet wurde als eigentlich vorhanden war. Dies würde dann zu einer Unterschätzung der physischen Vulnerabilität führen.

KAPITEL 8:

SCHLUSSFOLGERUNG - AUSBLICK

Zum Abschluss dieser Masterarbeit wird nochmal auf die zu Beginn definierten Fragestellungen und Zielsetzungen eingegangen. Die beiden primären Zielsetzungen, einen Beitrag zum Problem der fehlenden Daten zu leisten und einen ersten Vorschlag für das methodische Vorgehen bei der Anwendung von numerischen Simulationsprogrammen für schadenbasierte Vulnerabilitätsanalysen zu geben, können als erfüllt angesehen werden.

Schliesslich wird in Kapitel 8.2 noch ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf und mögliche Implementierungen des generierten Wissens in der Praxis gegeben.



Titelbild von Kapitel 8: Schwemmkegel bei Susten (VS) als Beispiel für die Siedlungsnutzung im Einflussbereich von fluvialen Systemen im Gebirge (© Google Earth).

8.1 Schlussfolgerung

Das Kapitel 8.1 ist anhand der Fragestellungen dieser Masterarbeit strukturiert:

1. Was für ein Klassierungssystem mit welchen Intensitätskriterien kann bezogen auf die schadensverursachende Wirkung bei einer Vulnerabilitätsanalyse hergeleitet werden?
⇒ **Kapitel 8.1.1**
2. Wie unterscheiden sich die Ergebnisse der physischen Vulnerabilität mit diesem Klassierungssystem im Vergleich mit dem konventionellen System nach Loat und Petraschek (1997) mit dem Kriterium $v \cdot h$ beim Fallbeispiel Baltschieder ?
⇒ **Kapitel 8.1.2**
3. Welche Objekt- und Umgebungsparameter könnten einen Einfluss auf die physische Vulnerabilität der untersuchten Wohngebäude in Baltschieder gehabt haben?
⇒ **Kapitel 8.1.3**
4. Wie kann BASEMENT bei der Rekonstruktion der Prozessintensität in einer Vulnerabilitätsanalyse verwendet werden?
⇒ **Kapitel 8.1.4**

8.1.1 Schadenbasiertes Klassierungssystem

In der vorliegenden Arbeit wurde ein auf der Entstehung des Schadens basierendes Klassierungssystem entwickelt und angewendet. Hauptziel davon war es, den als physische Vulnerabilität bezeichneten Zusammenhang zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit besser abbilden zu können. Dabei wurde mit der effektiven Wirkungshöhe ein neues Intensitätskriterium eingeführt, welches in Kombination mit der zeitgleichen Fließgeschwindigkeit für die Zuordnung in eine der drei Intensitätsklassen schwach, mittel oder stark verwendet wurde. Für die Definition der Klassengrenzen sind die Charakteristika von Fensterscheiben bezüglich Widerstandsfähigkeit und Lage in der Gebäudefassade berücksichtigt worden. Fenster stellen nämlich zusammen mit den anderen Gebäudeöffnungen wichtige steuernde Größen der physischen Vulnerabilität dar.

Das neu vorgestellte Klassierungssystem ist ein erster Ansatz sowohl Prozess- als auch Objektparameter des Wohngebäudes in der Gestaltung der Intensitätskriterien des Klassierungssystems zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit zeigte sich auch eine Reihe von Limitationen dieses neu entwickelten Klassierungssystems welche nachfolgend kurz beschrieben werden:

- Es fehlt die empirische Grundlage für die Frage, ab welcher Magnitude der physikalischen Einwirkung einer feststoffführenden, dynamischen Überschwemmung Fensterscheiben zu Bruch gehen und das großflächige Eindringen des Wasser-Feststoffgemisches ermöglichen. Dies führt potentiell zu Unschärfen beim Setzen der Klassengrenzen.
- Die Individualität der Gebäude bezüglich Art, Qualität und Lage der Fenster scheint eine wichtige Quelle für die Streuung innerhalb der Intensitätsklassen zu sein, wird aber beim Klassierungssystem nicht vollumfänglich berücksichtigt.
- Die Entwicklung der Widerstandsfähigkeit der Bausubstanz über die Jahre ist eine weitere Herausforderung, welche sich bei den Klassengrenzen des Klassierungssystems ergibt.

- Das Kriterium der Fließgeschwindigkeit wurde bei der Fallstudie in Baltschieder im Klassierungssystem verwendet, um auch Gebäude, welche eher von statischer Überschwemmung betroffen waren zu berücksichtigen. Andernfalls hätte sich die ohnehin geringe Stichprobe an Gebäuden noch um mehr als die Hälfte verkleinert. Dies führt jedoch dazu, dass es vor allem in der Intensitätsklasse schwach zu grösseren Streuungen kommt, da zwei von ihrer physikalischen Einwirkung her stark unterschiedliche Prozesse dort Eingang finden.

Aus den beschriebenen Limitationen wird unter anderem ersichtlich, dass es eine grosse Herausforderung darstellt, in das Klassierungssystem neben den Prozesscharakteristika möglichst akkurate, schadensverursachende Gebäudeeigenschaften einzubringen. Dies ist jedoch für die Bestimmung von robusten Vulnerabilitätswerten entscheidend, da die physische Vulnerabilität nicht nur von der Prozessintensität sondern auch vom betroffenen Gebäude abhängt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Klassierungssystem ist als ein erster Schritt in diese Richtung zu sehen, wobei Fenster als Gebäudeelemente in die Klassierung miteinbezogen wurden.

8.1.2 Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs der vorliegenden Studie sind die gefundenen Vulnerabilitätswerte sowohl für das neu entwickelte Klassierungssystem als auch für das Intensitätskriterium $v \cdot h$ von beschränkter Aussagekraft. Die Heterogenität der einzelnen Wohngebäude ist im Vergleich zu der geringen Stichprobenmenge von nur 20 untersuchten Wohngebäuden zu gross, um robuste Aussagen über deren physische Vulnerabilität zu machen. Dies war jedoch, wie eingangs des Kapitels erwähnt, auch nicht das vordergründige Ziel der vorliegenden Masterarbeit.

Trotz der geringen Stichprobe wird für die mit Hilfe des $v \cdot h$ -Kriteriums gefundenen Medianwerte der physischen Vulnerabilität mit Ausnahme der starken Intensitätsklasse eine hohe Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur festgestellt. Für die Medianwerte der physischen Vulnerabilität des neu entwickelten Klassierungssystems besteht diesbezüglich noch Validierungsbedarf durch weitere Studien, welche ebenfalls ein schadenbasiertes Klassierungssystem anwenden.

Im Vergleich mit dem auf der Multiplikation der zeitgleich maximalen Fliesstiefe und -geschwindigkeit ($v \cdot h$) basierenden Klassierungssystem scheint der Zusammenhang zwischen Intensität und Schadenempfindlichkeit bei der effektiven Wirkungshöhe besser beschrieben zu sein. Dies ist wahrscheinlich eine Folge davon, dass Gefährdungsüberlegungen des Menschen bei der Konzeption des $v \cdot h$ -Kriteriums im Vordergrund standen und die Ablagerungshöhe als für die Wirkungshöhe entscheidender Parameter nicht berücksichtigt wird. Auch entspricht beim neu entwickelten Klassierungssystem die Aufteilung der Medianwerte der physischen Vulnerabilität auf die drei Intensitätsklassen besser der Definition der physischen Vulnerabilität als Wert zwischen 0 und 1.

Grundsätzlich kann das Axiom der Zunahme der Schadenempfindlichkeit mit ansteigender Intensität für beide Klassierungssysteme bestätigt werden. Auch die in anderen Studien festgestellte Zunahme der Streuung der Schadenempfindlichkeitswerte mit zunehmender Intensität deckt sich mit den gemachten Untersuchungsergebnissen in beiden Klassierungssystemen. Dabei konnte im Bereich einer effektiven Wirkungshöhe von 0.5 m – 1 m das individuelle Vorhanden- oder Nichtvorhandensein von Gebäudeöffnungen sowie die Integration von Gebäuden welche durch statische und dynamische Überschwemmungen betroffen waren, als mögliche Gründe für das Streuverhalten angeführt werden. So zeigen Gebäude, mit wenigen Gebäudeöffnungen in Anströmrichtung in diesem Intensitätsintervall geringere Schadenempfindlichkeiten. Gebäude, welche im Einflussbereich einer eher statischen Überschwemmung mit Fließgeschwindigkeiten < 1 m/s waren, zeigen ebenfalls geringere Schaden-

empfindlichkeiten. Dies suggeriert gleichzeitig, dass Wohngebäude gegenüber dynamischen Überschwemmungen mit Fließgeschwindigkeiten > 1 m/s vulnerabler reagieren.

8.1.3 Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparametern mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität

Auch bei der Identifizierung von Objekt- und Umgebungsparametern mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität sind vertiefte Studien mit einer grösseren Stichprobenmenge nötig. Die im Rahmen dieser Studie identifizierten Objektparameter sind die Lage und Art von Gebäudeöffnungen sowie die Nutzung des Erdgeschosses. Diese Parameter deuten an, dass bei entsprechender Konzeption eines Gebäudes die Schäden, Schadenempfindlichkeit und damit auch die physische Vulnerabilität bedeutend verringert werden könnten. Wie die untersuchten Gebäude gezeigt haben, würden wahrscheinlich bereits der Verzicht auf ein Untergeschoss, Lüftungsschächte, bis zum Boden reichende Fenstertüren oder auf die Nutzung des Erdgeschosses als Wohnraum sowie die erhöhte Lage der Fenster aktiv zu einer Verringerung der Vulnerabilität und damit des Risikos beitragen.

Auch bei bestehenden Gebäuden könnte mit einem vertieften Wissen über die Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität bezüglich der korrekten Implementierung von Objektschutz ein Beitrag zur effektiven Senkung des Risikos geleistet werden. Dies vor allem in der gelben Gefahrenzone mit geringen Intensitäten.

In weiteren Studien sollte noch vermehrt über den konkreten Einfluss von Umgebungsparametern wie Mauern, Zäune oder die Vegetation in Erfahrung gebracht werden. In der vorliegenden Studie war kein klarer Einfluss der Umgebungsparameter erkennbar. Das Wissen darüber wäre aber dennoch wichtig, um beispielsweise bei implementiertem Objektschutz in der Umgebung eines Gebäudes keinen negativen Einfluss auf ein anderes zu nehmen.

8.1.4 Methode für die Vulnerabilitätsanalyse mit BASEMENT

Schlussendlich konnte gezeigt werden, dass BASEMENT als Simulationssoftware einen wertvollen Beitrag zur Rekonstruktion von Prozessintensitäten in Vulnerabilitätsanalysen liefern kann. Es bleibt aber mit Nachdruck zu unterstreichen, dass eine seriöse Kalibrierung der Simulationsergebnisse anhand von dokumentierten Ablagerungshöhen unabdingbar ist. Dies bedingt gleichzeitig, dass im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse bei der BASEMENT für die Rekonstruktion von Intensitätskriterien zum Einsatz kommt, zunächst eine möglichst fundierte Kalibrierungsgrundlage erstellt wird. Neben Bildmaterial könnten Befragungen von Einwohnern und Einsatzkräften eine weitere Quelle zur Rekonstruktion von Ablagerungshöhen am Ende des Ereignisses darstellen. Zusammenfassend bietet die numerische Simulation mit BASEMENT die Möglichkeit dynamisch über das gesamte Ereignis von einem ex-post relativ gut rekonstruierbaren Proxy wie der Ablagerungshöhe auf weitere Prozesscharakteristika wie Fliesstiefe und – geschwindigkeit zu schliessen, welche im Kontext der Schadenentstehung am Gebäude ebenfalls wichtig sind.

Die Beschaffung der Versicherungsdaten stellt vor allem für Studien mit grösseren Stichproben in der Schweiz eine wichtige Herausforderung dar. Aufgrund des schweizerischen Versicherungssystems gegen Elementarschäden müssten wohl eine Vielzahl von privaten und kantonalen Assekuranzen bereit sein, Schadendaten und Versicherungssummen oder zumindest die Schadenempfindlichkeit für ein derartiges Projekt bereitzustellen. Aufgrund der Datenschutzbestimmungen und des gegenseitigen Konkurrenzverhältnisses könnte dies mitunter schwierig umzusetzen sein. Nichts desto trotz haben sich die von der Mobiliar in dieser Arbeit zur Verfügung gestellten Daten als wertvolle Grundlage für

die vorliegende Vulnerabilitätsanalyse erwiesen. Dabei hat der Rechtsdienst der Mobiliar bestätigt, dass die Art und Weise wie Versicherungsdaten durch die hier vorgeschlagene Methodik verarbeitet und präsentiert werden, datenschutzkonform ist.

8.2 Ausblick

Schreitet die sozio-ökonomische Entwicklung in der Schweiz mit Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum weiter voran wie bisher, ist davon auszugehen, dass der Druck auf Boden als Bauland für Siedlungen und die Industrie zunehmen wird. Nutzbares Bauland ist aber vor allem in den Alpen seit jeher knapp. Unter dieser Konstellation wird die räumliche Überschneidung von Siedlungsraum und Naturprozessen in Zukunft möglicherweise noch schwieriger zu vermeiden sein, was die Risiken gegenüber Prozessen wie dynamischen, feststoffführenden Überschwemmungen weiter ansteigen lassen wird. Um derartige Risiken auf Schwemmkegeln in den Alpen auch zukünftig begegnen zu können, ist es deshalb zentral, eine fundierte Kenntnis bezüglich der physischen Vulnerabilität von Wohngebäuden und ihren Einflussfaktoren zu generieren.

Eine verbesserte Kenntnis der physischen Vulnerabilität ermöglicht dabei den Versicherungen einerseits Risiken möglichst präzise einzuschätzen, um diese im Ereignisfall auch decken zu können und so wesentlich zur Regeneration beizutragen. Andererseits kann ein verbessertes Verständnis über die Faktoren, welche die physische Vulnerabilität steuern, zudem dazu beitragen, dass Risiken auf Objektstufe durch Objektschutz oder angepasste Gebäudekonzeption verringert werden.

Im Rahmen dieser Studie ist es aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nicht möglich robuste Medianwerte für die physische Vulnerabilität oder gesicherte Einflussfaktoren auf die physische Vulnerabilität zu präsentieren. Deshalb sind zusätzliche Studien mit auf der Schadensentstehung basierenden Klassierungssystemen unabdingbar. Zur Verbesserung der Schadenrelevanz der Klassengrenzen sollten zudem empirische Versuche mit Fensterscheiben bezüglich Energieaufnahmekapazität und Druckfestigkeit gegenüber der Einwirkung von feststoffführenden, dynamischen Überschwemmungen durchgeführt werden.

Eine Studie, beispielsweise im Rahmen einer Dissertation, könnte unter Umständen genügend betroffene Gebäude integrieren, dass einzig auf feststoffführende, dynamische Überschwemmungen als Prozess fokussiert werden könnte. Alle von statischen Überschwemmungen betroffenen Gebäude müssten dann nicht wie in der Fallstudie Baltschieder ebenfalls berücksichtigt werden. Ausserdem könnten bei genügend Daten die physische Vulnerabilität von Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser getrennt voneinander untersucht werden. Die Möglichkeit mit der vorgestellten Methode weitere Gebäudetypen zu untersuchen besteht ebenfalls.

Eine grösser angelegte Studie wäre zudem einer weiteren Fallstudie mit begrenzter Anzahl betroffener Gebäude vorzuziehen, da bis dato bereits eine gewisse Anzahl einzelner Studien mit geringen Stichproben und zum Teil unterschiedlichen Methoden besteht, deren Aussagekraft bezüglich physischer Vulnerabilitätswerte dementsprechend eher gering ist. Eine grösser angelegte Studie mit einheitlicher Methodik würde unter Umständen auch die Möglichkeit bieten, Daten zu der hier präsentierten Intensitätsklasse stark mit effektiven Wirkungshöhen von > 3.65 m zu generieren. Dabei wäre jedoch darauf zu achten, dass alle in die Studie integrierten Wohngebäude in der Schweiz liegen, um eine möglichst einheitliche Bauweise für die Herleitung von Vulnerabilitätswerten zu garantieren.

Die Grundvoraussetzung für das Erstellen einer auf möglichst vielen Schadenfällen abgestützten Studie ist die Bereitschaft möglichst vieler Versicherungsgesellschaften die benötigten Daten zu liefern.

Vor allem in den GUSTAVO – Kantonen ist dies wichtig, da es wahrscheinlich ist, dass pro Ereignis jeweils versicherte Gebäude von mehreren privaten Assekuranzgesellschaften betroffen sind.

Sobald als einigermaßen robust validierte Vulnerabilitätswerte und Einflussparameter der physischen Vulnerabilität hergeleitet sind, würde als nächste Herausforderung deren Anwendung und Umsetzung in der Risikoquantifizierung der Praxis folgen. Um der grossen Heterogenität der Wohngebäude bei der späteren Anwendung bei der Quantifizierung von Risiken in der Praxis gerecht zu werden, müssten wohl Informationen zur Nutzungsart des Erdgeschosses oder der Art und Lage der Gebäudeöffnungen im Feld aufgenommen werden. Diese für die physische Vulnerabilität wichtigen Einflussgrößen könnten dann bei der Zuordnung zu einer Intensitätsklasse ebenfalls berücksichtigt werden. So könnte beispielsweise für ein Wohngebäude, dass aufgrund des jetzigen Klassierungssystems zur mittleren Intensitätsklasse gehört, bei entsprechenden klar festgelegten Charakteristika wie erhöhten Gebäudeöffnungen, kein Untergeschoss mit Lüftungsschächten oder der Nicht-Wohnnutzung des Erdgeschosses der Vulnerabilitätswert der schwachen Intensitätsklasse zur Risikoquantifizierung verwendet werden. Diese Art von objektbasierter Vulnerabilitätsanalyse wäre zwar mit viel Aufwand verbunden, würde jedoch der Individualität der Wohngebäude Rechnung tragen und so in der späteren Praxis womöglich zu robusteren Werten bei der Quantifizierung des Risikos beitragen.

Für den Wissenstransfer der identifizierten Objektparameter mit Einfluss auf die physische Vulnerabilität in die Praxis kann die Assekuranz eine wichtige Rolle einnehmen, in dem sie Objektschutz und naturgefahrenrechtes Bauen der versicherten Gebäude in ihrem Portfolio aktiv fördern. Prämienanreize, die Beteiligung an Kosten für die Objektschutzimplementierung, Sensibilisierungskampagnen oder der Ausschluss von Schäden an Gebäuden ohne angepasste Bauweise und Objektschutz könnten geeignete Instrumente hierfür sein.

Eine weitere Möglichkeit würden SIA – Normen für naturgefahrenrechtes Bauen darstellen. Zur Zeit wird beim SIA der Anpassungsbedarf der Normen und Verordnungen bezüglich naturgefahrenrechtes Bauens geprüft. Schliesslich bieten auch kantonale Baureglemente eine Möglichkeit aktiv Einfluss auf die naturgefahrenrechte Planung und den Bau von Gebäuden zu nehmen, indem beispielsweise in gefährdeten Parzellen Auflagen gemacht würden. So könnte die Wohnnutzung im Erdgeschoss oder der Bau eines Untergeschosses auf diesen Parzellen untersagt werden.

Zusammenfassend stellt die grosse Heterogenität der individuell gestalteten Bausubstanz in Kombination mit der sich über die Zeit weiterentwickelnden Widerstandsfähigkeit von Bauelementen wohl die grösste Herausforderung in der physischen Vulnerabilitätsanalyse dar. Ein vertieftes Verständnis der Ursachen und Auswirkungen von feststoffführenden, dynamischen Überschwemmungen auf Wohngebäude bildet in Zukunft die Grundlage zur Konsolidierung des Risikos auf alpinen Schwemmfächern. Dies ist schlussendlich im Interesse aller Beteiligten - von der Versicherung bis zum Hausbesitzer.

„Mehr wissen, weniger riskieren“ (Carayol und Gramaccia, 2001).

LITERATURVERZEICHNIS

- Akbas, S.O.; Blahut, J.; Sterlacchini, S. 2009: Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. In: Malet J., Remaitre A., Bogaard T. (Hrsg.), Proceedings of landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling, 2009, 229-233.
- Alexander, D. 1993: Natural disasters, Kluwer Academic Publishers, 1993, London.
- Andres, P. und Oberndorfer, S. 2008: Beurteilung von Naturgefahren – Gefahr, Risiko und Vulnerabilität. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) Praxis Information, 2008, 15, 5-6.
- Badoux, A. und Rickenmann, D. 2008: Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis. Wasser Energie Luft, 2008, 3, 217-226.
- Bänziger, R. 1989: Ursachenanalyse Hochwasser 1987 (interdisziplinäres Forschungsprogramm des Bundesamtes für Wasserwirtschaft). Abschlussbericht zum Teilprojekt A1: Schwemmholz; Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- Bathurst, J.C.; Graf, W.H.; Cao, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. (Hrsg.), Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, 1987, 453 – 492, Chichester.
- Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F. 2009: Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG., 2009, Berlin.
- Berti, M. und Simoni, A. 2007: Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. Geomorphology, 2007, 90, 144-161.
- Bezzola, G. R. 2011: Damage to the built environment. Damage to Structures. (unveröffentlichter Vortrag). 2011, Zürich.
- Bezzola, G. R. und Hegg, C. 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen, 2008, 0825, 429ff.
- Bezzola, G. R.; Kuster, P.; Pellandini, St. 1990: The Reuss River Flood of 1987 – Hydraulic Model Tests and Reconstruction Concepts. International Conference on River Flood Hydraulics, Wallingford, UK, 1990, J2, 317-326.
- Biaggi, R. und Zumstein, R. 2001: Als der Bach kam. Baltschieder Unwetterkatastrophe 15. Oktober 2000. Hochschule für Wirtschaft, 2001, Visp.
- Birkmann, J. 2006: Indicators and criteria for measuring vulnerability: Theoretical bases and requirements. In: Birkmann, J. Measuring Vulnerability to Natural Hazards. United Nations University Press, 2006, 55-77.
- Borner, P. 1999a: Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Methode. Reihe: Umwelt-Materialien, Nr. 107/I, Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1999, Bern.

- Borler, P. 1999b: Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Fallbeispiele und Daten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1999, Bern.
- Buckle, P; Marsh, G.; Smale, S. 2000: New approaches to assessing vulnerability and resilience. *Austrian Journal of Emergency Management*, 2000, 15, 8-14.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2010: EconoMe-Develop 1.0. Online-Berechnungsprogramm zur Bestimmung der Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gemäss Leitfaden Risikokonzept. 2010, Bern.
- Bunza, G.; Karl, J.; Mangelsdorf, J. 1982: Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. - Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 1982, 17, München.
- Burkard, A. 2005: Wege durch die Wasserwelt – Hydrologische Exkursionen in der Schweiz. Hochwasser Saltina Schallberg – Brig. Hydrologischer Atlas der Schweiz, 2005, Bern.
- Busch, P. 1986: Geomorphologie. *Grundriss Allgemeine Geographie*, Schönigh, 1986, 30, Paderborn.
- Carayol, V. und Gramaccia, G. 2001: *La communication du risque. Communication et organisation*. Presses universitaires de Bordeaux 2001, 20, Bordeaux.
- Choffet, M. 2013: Les coûts des dommages éléments naturels aux bâtiments et l'influence des facteurs du risque dans un contexte d'assurance immobilière. Analyse de cas des inondation et de la grêle en Suisse. Inauguraldissertation. Universität Lausanne, Fakultät der Geo- und Umweltwissenschaften, 2013, Lausanne.
- DIN EN 356: 2000-02: Glas im Bauwesen – Sicherheitsverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff; EN 356-1999.
- DIN EN 572-1:2012-11: Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. EN 572-1:2012.
- Douglas, J. 2007: Physical vulnerability modeling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7, 283-288.
- Egli, T. 2007: Wegleitung Objektschutz gegen meteorologische Naturgefahren. *Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (Hrsg.)*, 2007, 43 – 59, Bern.
- Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS, Bundesamt für Landestopographie swisstopo 2013: swissALTI^{3D}, Ausgabebericht 2013. 2013, Bern.
- Eigenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL 2014: BAFU-Projekt: Feststofftransport in Gebirgs-Einzugsgebieten. http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/wildbaeche/projekte/bafu_feststofftransport/index_DE. Stand: 15.04.2014.
- Fell, R. 1994: Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31, 261 – 272.

- Fell, R. und Hartford, D. 1997: Landslide risk management. *Landslide risk assessment*, 1997, 51-109, Rotterdam.
- Fuchs, S. 2009: Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria – paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9, 337-352.
- Fuchs, S. und Heiss, K. 2008: Vulnerability to torrent events. Method and discussion emerging from an austrian study. *Congress Interpraevent*, 2008, 311-322.
- Fuchs, S.; Heiss, K.; Hübl, J. 2007: Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7, 495-506.
- Fuchs, S.; Kohlicke, C.; Meyer, V. 2011: Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards – the challenge of integration. *Natural Hazards*, 2011, 58, 609-619.
- Fuchs, S.; Tsao, T.; Keiler, M. 2012: Quantitative vulnerability functions for use in mountain hazard risk management. The challenge of transfer. *Congress Interpraevent*, 2012, 885 - 896.
- Gamma, P. 2000: dfwalk – Ein Murgangsimulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Inauguraldissertation. Universität Bern Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, 2000, Bern.
- Glade, T. 2007: Raum-Zeit-Analysen in der Geomorphologie – ein Beitrag zur Risikoforschung. Antrittsvorlesung, Universität Wien, 15.01.2007.
- Glade, T. und Pöppel, R.E. 2013: Naturgefahren- und Risikoforschung im Alpenraum – eine Einführung. *Geographie und Schule*, 2013, 204, 4-11.
- Gsponer, P. 2005: Baugesuchsverfahren im Kanton Wallis – national ein Vorzeigemodell. (unveröffentlichter Vortrag). 2005, Sion.
- Guzzetti, F. ; Carrara, A. ; Cardinali, M.; Reichenbach, P. 1999: Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. *Geomorphology*, 1999, 31, 181-216.
- Hählen, N. 2012: Gefahrenbeurteilung bei Wildbächen, Gebirgs- und Talflüsse. Tiefbauamt des Kantons Bern, 2012, 9ff, Thun.
- Hegg, C; Rickenmann, D.; Forster, F. 2001: Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten. *Bulletin angewandte Geologie*, 2001, 6, 85-97.
- Hegg, C.; Schmid, F.; Frick, E. 2002: Hochwasser 2000. Ereignisanalysen / Fallbeispiele. *Berichte des BWG, Serie Wasser*, 2002, 2, Bern.
- Helle, U. 2014: Europäisches Prüfzentrum für Bauelemente (PfB). Schriftliche Mitteilung vom 17.06.2014.
- Hochschwarzer, M. 2009: Vergleich von Simulationsmodellen zur Reichweitenabschätzung alpiner Murgänge am Beispiel südtiroler Ereignisse. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur (BOKU) Departement für Bautechnik und Naturgefahren, 2009, Wien.

- Holub, M. und Hübl, J. 2008: Local protection against mountain hazards – State of the art and future needs. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, 8, 81-99.
- Holub, M.; Suda, J.; Fuchs, S. 2012: Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66, 1853-1870.
- Hübl, J. 2009: Ereignisdokumentation Prozesse: Wasser, Universitätskurs Ereignisdokumentation, Hrsg. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, 2009, Wien.
- Hübl, J., Hochschwarzer M., Sereinig, N., Wöhrer-Alge, M. 2011: Alpine Naturgefahren. Ein Handbuch für Praktiker. Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg, 2011, Vorarlberg.
- Hübl, J.; Kienholz, H.; Loipersberger, A. (Hrsg.) 2006: DOMODIS: Dokumentation alpiner Naturereignisse, Schriftreihe 1, Handbuch 1, Interpraevent, 2006, Klagenfurt.
- Hufschmidt, G. und Glade, T. 2010: Vulnerability analysis in geomorphic risk assessment. In: Alcántara-Ayala I, Hrsg: Goudie, A. S., *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge University Press, 2010, 233-243, New York.
- Jaboyedoff, M. und Bonnard, C. 2007: Report on Landslide impacts and practices in Switzerland: need for new risk assessment strategies. In: the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management, 2007, 79-97.
- Jäggi, M.; Nigg, U.; Teyssie, P. 2004: The sediment disaster of Baltschieder. *Congress Interpraevent*, 2004, 165-180.
- Kämpf, E. 2011: Wie lese ich die Gefahrenkarte Hochwasser ? Abteilung Landschaft und Gewässer des Kantons Aargau. 2011, 34, Aarau.
- Kanton Wallis 2008: Dritte Rhonekorrektur – Allgemeines Informationsblatt 1. Departement für Verkehr, Bau und Umwelt. Dienststelle für Strassen- und Flussbau. 2008, Sion.
- Kaswalder, C. 2009: Schätzungsstudie zur Berechnung des Schadenpotentials bei Hochwasserereignissen durch die Rienz im Abschnitt Bruneck-St. Lorenzen. Autonome Provinz Bozen, Südtirol.
- Keller, F.; Frauenfelder, R.; Gardaz, J.-M.; Hoelzle, M.; Kneisel, C.; Lugon, R.; Philips, M.; Reynard, E.; Wenker, L. 1998: Permafrost map of Switzerland. *PERMAFROST-seventh international Conference (Proceedings)*, 1998, 55, 557-562.
- Kienholz, H (1995): Gefahrenbeurteilung und –bewertung – auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. *Schweiz. Z. Forstw.*, 1995, 146, 701-725.
- Kimmerle, R. 2002: Schadenempfindlichkeit von Gebäuden gegenüber Wildbachgefahren. Diplomarbeit Geographisches Institut Uni Bern, 2002, Bern.
- Kipfer, A. 2014: GEO 7 AG, Geowissenschaftliches Büro. Abteilung Naturgefahren. Schriftliche Mitteilung vom 16.07.2014.

- Kohli, A. 1998: Kolk an Gebäuden in Überschwemmungsebenen. Mitteilung Nr. 157 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), 1998, Zürich.
- Künzler, M. 2014: Schweizerische Mobiliar Versicherungsgesellschaft AG. Schriftliche Mitteilung vom 25.06.2014.
- Lange, D. und Bezzola, G. R. 2006: Schwemmholz. Probleme und Lösungsansätze. Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie (VAW) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH), 2006, Mitteilungen 188.
- Leser, H. (Hrsg.) 2005: Wörterbuch Allgemeine Geographie. Aktualisierte Neuauflage. Gemeinschaftsausgabe Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München und Westermann Schulbuchverlag GmbH, 2005, 355, Braunschweig.
- Lo, W.C.; Tsao T. C.; Hsu C.H. 2012: Building vulnerability to debris flows in Taiwan: a preliminary study. *Natural Hazards*, 2012, 64, 2107 – 2128.
- Loat, R. und Petrascheck, A. 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen 1997. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1997, Bern.
- Mäder, K. 2001: Die Raumhöhe im Mietwohnungsbau. Unveröffentlichte Diplomarbeit, 2001, ETH Zürich.
- Mani, P. 1996: Sedimentkaskaden in Wildbacheinzugsgebieten: A Gis-Based Approach. Congress Interpraevent, 1996, 71-81.
- Mazzorana, B. 2007: Woody Debris Recruitment and Transport- a possible GIS based computational procedure, 2007, Bozen.
- Meili, R. 2014: Schweizerisches Institut für Glas am Bau (SIGAB). Schriftliche Mitteilung vom 12.06.2014.
- Melton, M. A. 1965: The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. *The Journal of Geology*, 1965, 73, 1-38.
- Meyer, A. 2014: Schollglas Dienstleistungs- und Entwicklungsgesellschaft GmbH. Schriftliche Mitteilung vom 16.06.2014.
- Nadim, F. und Kjekstad, O. 2009: Assessment of global high-risk landslide disaster hotspots. In: Sassa, K und Canuti, P. (Hrsg.), *Disaster Risk Reduction*, Springer-Verlag, 2009, 213-221, Berlin.
- Naef, F. ; Scherrer, S.; Faeh, A. 1998: Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Nierschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser. Projektabschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderung und Naturkatastrophen“, NFP 31, vdf Hochschulverlag AG, 1998, Zürich.
- Nellen, M. 2000: Unwetterkatastrophe vom 15. Oktober 2000 in Baltschieder. Zeugenbericht von Markus Nellen. Gemeinde Baltschieder. In : *Als der Bach kam. Baltschieder Unwetterkatastrophe 15.Oktober 2000*. Baltschieder, 2001.

- Nellen, M. 2014: Gemeindepräsident Baltschieder und Fourier der Feuerwehr/Einsatzzentrale im Jahr 2000. Schriftliche Mitteilung vom 20.08.2014.
- Nigg, U.; Teyssere, Ph.; Jäggi, M.; Hegg, Ch. 2002: Baltschieder, Fallbeispiele, Hochwasser 2000. Berichte des BWG, Serie Wasser, 2002, 2, 206-210.
- Nitsche, M.; Rickenmann, D.; Turowski, J. M.; Badoux, A.; Kirchner, J. W. 2011: Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 2011, 47, 2-21.
- Oberndorfer, S.; Fuchs, S; Rickenmann, D.; Andrecs, P. 2007: Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich, BFW-Bericht, 139, Bundesausbildungs- und Forschungszentrum für Wals, Naturgefahren und Landschaft, 2007, Wien.
- ÖNORM M 7132 1986: Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff – Begriffsbestimmungen und Merkmale. 1986, Wien.
- ONR-24800 2009: ON-Komitee 256 – Schutz vor Naturgefahren. 2009, Wien.
- Papathoma-Köhle, M.; Kappes, M.; Keiler, M.; Glade, T. 2011: Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Nat Hazards*, 2011, 58, 645-680.
- Papathoma-Köhle, M.; Keiler, M.; Totschnig, R.; Glade, T. 2012a: Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Nat Hazards*, 2012, 64, 2083 – 2105.
- Papathoma-Köhle, M.; Totschnig, R.; Keiler, M.; Glade, T. 2012b: A new vulnerability function for debris flow. The importance of physical vulnerability assessment in alpine areas. *Congress Interpraevent*, 2012, 1033 – 1043.
- Pittet, C.; Kaufmann, Y.; Kämpf, E.; Dändliker, P. G. 2012: Erstellen von Gefahrenkarten. Leitfaden und Datenmodell. Version 11.1. 2012, Solothurn.
- Pöppl, R. und Glade, T. 2013: Naturgefahren- und Risikoforschung im Alpenraum. Einige Grundlagen. *Geographie und Schule*, 2013, 35, 5-11.
- Quan Luna, B.; Blahut, J.; van Westen, C. J.; Sterlacchini, S.; van Asch, T.,W.,J.; Akbas, S., O., 2011: The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11, 2047 – 2060.
- Rickenmann, D. 2005: Geschiebetransport bei steilen Gefällen. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 2005, Zürich.
- Rickenmann, D.; Hunzinger, L.; Koschni, A 2008: Hochwasser und Sedimenttransport während des Unwetters vom August 2005 in der Schweiz. *Congress Interpraevent 2008*, 465 – 476.
- Riegger, W. 2006: Sortieren und Klassieren von Industrieholz. Die Allgemeinen Sortiervorschriften. Interessensgemeinschaft Industrieholz, 2006, Zürich.

- Romang, H. 2004: Wirksamkeit und Kosten von Wildbach-Schutzmassnahmen. Verlag des Geographischen Instituts der Universität Bern, 2004, Bern.
- Rousselot, P.; Vetsch, D.; Fäh, R. 2012: Numerische Fließgewässer-Modellierung. In: Merkblatt-Sammlung Wasserbau und Ökologie. BAFU, Bern. Merkblatt 7.
- Rudolf-Miklau, F. und Suda, J. 2012: Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz. Springer Verlag, 2012, Wien.
- Rudolf-Miklau, F.; Hübl, J.; Rauch, H.P.; Kogelnig, A.; Habersack, H.; Schulev-Steindl, E. 2011: Handbuch Wildholz – Praxisleitfaden. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt.
- Schweizerische Interessengemeinschaft Industrieholz 2006: Sortieren und Klassieren von Industrieholz. Faltblatt, 2006, Zürich.
- Sendzik, W. 2003: Fraktionierung von Geschiebetransportarten in morphodynamisch-numerischen Modellen; unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 2003, Hannover.
- Sendzik, W. 2003: Fraktionierung von Geschiebetransportarten in morphodynamischen-numerischen Modellen. Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, 2003, Universität Hannover.
- Shields, A. 1936: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffbau, 1936, Heft 26.
- SIA 331 : 2012: Fenster und Fenstertüren. 2012, SIA Zürich.
- Siever, R.; Press, F.; Jordan, T.H.; Grotzinger, J. 2008: Allgemeine Geologie. Springer-Verlag, 2008, Berlin.
- Spichtig, S. und Bründl, M. 2008: Verletzlichkeit bei gravitativen Naturgefahren – eine Situationsanalyse. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, 2008, Bern.
- Steuer, M. 1979: Wahrnehmung und Bewertung von Naturrisiken am Beispiel ausgewählter Gemeinschaftsfraktionen im Friaul. Münchener Geographische Hefte, 1979, 43.
- Stiny, J. 1931: Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern, 1931, Wien.
- Suter, B. 1988: Das Fenster: Gestaltungselement und/oder Bauteil. Die neue SIA Norm 331 „Fenster“. Schriftenreihe 9, Egon Kiefer, 1988.
- Thywissen, K. 2006: Components of Risk: A Comparative Glossary, Source 2, Publication Series of UNU-EHS, 2006, Bonn.
- Totschnig, R. und Fuchs, S. 2012: A comparison of vulnerability functions for torrent processes. Congress Interpraevent, 2012, 1103- 1114.

- Totschnig, R. und Fuchs, S. 2013: Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology*, 2013, 155, 31-44.
- Totschnig, R.; Sedlacek, W.; Fuchs, S. 2011: A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Nat hazards*, 2011, 58, 681-703.
- Tsao, T.-C.; Hsu, W.-K.; Cheng, C.-T.; Lo, W.-C.; Chen, C.-Y.; Chang, Y.-L.; Ju, J.-P. 2010: A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan. *Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent*, 2010, 930-939, Klagenfurt.
- Turowski, J., M.; Badoux, A.; Rickenmann, D.; Fritschi, B. 2008: Erfassung des Sedimenttransportes in Wildbächen und Gebirgsflüssen – Anwendungsmöglichkeiten von Geophonmessenanlagen. *Wasser Energie Luft*, 2008, 1, 69-74.
- UNDRO 1979: *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Department of Humanitarian Affairs/United Nations Disaster Relief Office, 1979, 53ff., Geneva.
- UNDRO 1984: *Disaster prevention and mitigation – a compendium of current knowledge*, vol. 11 Preparedness Aspects, New York.
- Varnes, D.J. 1984: *Landslides hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO, 1984, Paris.
- VAW 1994: Die Grösse extremer Hochwasser der Saltina – Hydrologische Untersuchungen nach der Hochwasserkatastrophe in Brig vom 24.9.1993. *VAW Bericht*, 1994, Nr. 4094.
- Veit, M.D. 2013: *Larix decidua – Europäische Lärche (Pinaceae)*, Baum des Jahres 2012. *Jahrbuch Bochumer Botanischer Verein*, 2013, 4, 201-209.
- Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) 2014: Hagelschutzregister. <http://www.praever.ch/de/es/reg/Seiten/search.aspx?k1=HG%3d%3a%22'1'%22%7cBezeichnung%3a%22Fenster%22> Stand: 26.06.2014.
- Vetsch, D.; Ehrbar, D.; Peter, S.; Rousselot, P.; Volz, C.; Vonwiller, L.; Faeh, R.; Farshi, D.; Mueller, R.; Veprek, R. 2013 : BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. 2006-2013, VAW, ETH Zürich.
- Vogt, S. 2001: Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Diplomarbeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ETH, 2001, 90, Zürich.
- Vogt, S.; Forster, F.; Hegg, C. 2002: Clark-WSL – A method for the estimation of design flood hydrographs in small torrential catchments. *Proceedings of the Conference of Flood Estimation*, Bern, March 2002, International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR) Report II, 2002, 739-747, Bern.
- Waldner, P.; Köchli, D.; Usbeck, T.; Schmockler, L.; Sutter, F.; Rickli, C.; Rickenmann, D.; Lange D.; Hilker, N.; Wirsch, A.; Siegrist, R.; Hug, C.; Kaennel, M. 2005: Schwemmholz des Hochwassers 2005. Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholz Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 2005, Birmensdorf.

- Whittaker, J.G. und Jäggi, M. 1982: Origin of Step-Pool Systems in Mountain Streams. Proceedings of the ASCE, J. of the Hydraulics Division, 1982, 108, 758-773.
- Willuweit, J.; Küttel, P.; Bütikofer, D. 2003: Die europäische Lärche – *Larix decidua*. Hochschule Wädenswil, Fachabteilung Hortikultur, 2003.
- Wüthrich, M. 2011: Die einzigartige Elementarschadenversicherung. Schweizerischer Versicherungsverband SVV. 2011, Zürich.
- Zepp, H. 2008: Geomorphologie eine Einführung. Ferdinand Schönigh, 2008, Paderborn.
- Zimmermann, M. 1989: Geschiebeaufkommen und Geschiebemanagement. Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental. Geographica Bernensia, G34, Bern.
- Zimmermann, M.; Mani, P.; Gamma, P. 1997: Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP 31, vdf Hochschulverlag AG, 1997, Zürich.
- Zollinger, F. 1983: Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz; unveröffentlichte Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), 1983, Zürich.

ANHANG

Tabelle 27: Simulationseinstellungen einer Auswahl von durchgeführten Simulationen. (Die Tabelle wird auf den folgenden zwei Seiten fortgesetzt).

case	status	trsp fac	trsp form	lateral trsp	limit wetted	grav trsp		comment
						crit	dep	
0.1	x	1.5	smartjäggi	on	off	20	10	
0.2	x	1	smartjäggi	on	off	20	10	
0.3	x	1.5	smartjäggi	off	off	20	10	
0.4	x	1.5	smartjäggi	on	on	20	10	
0.5	x	1.1	smartjäggi	on	on	20	10	
0.6	x	1.2	smartjäggi	on	on	20	10	
0.7	x	1.3	smartjäggi	on	on	20	10	
0.8	x	1.4	smartjäggi	on	on	20	10	
0.9	x	1.25	smartjäggi	on	off	20	10	
1.0	x	1.5	smartjäggi	on	off	no	no	
1.1	x	1	smartjäggi	on	off	no	no	
1.2	x	1.8	smartjäggi	off	off	20	10	
1.3	x	1.5	smartjäggi	off	off	20	10	70`000 m3
1.4	x	1.5	smartjäggi	off	off	20	10	90000 m3
1.5	x	1.6	smartjäggi	off	off	20	10	90`000 m3
1.6	x	1.8	smartjäggi	off	off	20	10	90000 m3
1.7	x	1.6	rickenmann	off	off	20	10	90000 m4
1.8	x	1.8	rickenmann	off	off	20	10	90000 m5
1.9	x	1.9	rickenmann	off	off	20	10	90000 m6
2.1	x	1.1	rickenmann	on	off	20	10	
2.2	x	1.2	rickenmann	on	off	20	10	
2.3	x	1.3	rickenmann	on	off	20	10	
2.4	x	1.5	smartjäggi	off	off	20	10	
2.5	x	1.3	Rickenmann	on	off	20	10	
2.6	x	1.4	Rickenmann	on	off	20	10	
2.7	x	1.5	Rickenmann	on	off	20	10	
2.8	x	1.6	Rickenmann	on	off	20	10	

case	status	trsp fac	trsp form	lateral trsp	limit wetted	grav trsp		comment
						crit	dep	
2.9	x	1.7	Rickenmann	on	off	20	10	
3	x	1.8	Rickenmann	on	off	20	10	
3.1	x	1.5	mpm	on	off	20	10	
3.2	x	2.2	Rickenmann	on	off	20	10	
3.3	x	2.2	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
3.4	x	5	Rickenmann	on	off	20	10	
3.5	x	8	Rickenmann	on	off	20	10	
3.6	x	5	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
3.7	x	10	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
3.8	x	15	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
3.9	x	25	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
4.0	x	15	mpm	on	off	20	10	70 000m3
4.1		40	Rickenmann	on	off	20	10	70 000m3
4.2	x	25	mpm	on	off	20	10	70 000m3
4.3	x	15	mpm	on	off	20	10	70 000m3 mit d50 50cm
4.4	x	15	mpm	on	off	20	10	65000m3 mit d50 60cm
4.5	x	20	mpm	on	off	20	10	65000m3 mit d50 60 cm
4.6	x	20	mpm	on	off	20	10	70000 m3 d50 60cm
4.7	x	15	mpm	on	off	20	10	70000 m3 d50 60cm
4.8	x	15	Rickenmann	on	off	20	10	65000 d50 60cm
4.9	x	15	Rickenmann	on	off	20	10	65000 m3 d50 50
MK1	x	15	Rickenmann	on	off	20	10	130000 m3 d50 60
MK2	x	15	Rickenmann	on	off	20	10	130000 m3 d50 50
MK3	x	15	mpm multi	on	off	20	10	130000 m3 d50 60mm
MK4	x	12	mpm multi	on	off	20	10	130000 m3 d50 65 mm und 4 mm
MK5	x	13	mpm multi	on	off	20	10	130000 m3 d50 60 mm
MK6	X	10	mpm multi	on	off	20	10	130000 m3 d50 65 4
MK7	X	5	mpm multi	on	off	20	10	130000 m3 d50 65 4

case	status	trsp fac	trsp form	lateral trsp	limit wetted	grav trsp		comment
						crit	dep	
MK8	X	10	mpm multi	on	off	20	10	130000m3 d50 60 3
MK9	X	10	mpm multi	on	off	20	10	d50 55 2
MK10	X	13	mpm multi	on	off	20	10	d50 60 mm 3mm
MK11	X	13	mpm multi	on	off	20	10	d50 60 3 angle failure 15 dry and wet
MK12	X	13	mpmh	on	off	20	10	d50 60 3
MK13	X	13	mpm multi	on	off	20	10	120000 m3 d50 60 3
MK14	X	12	mpm multi	on	off	20	10	60 mm 3mm
MK15	X	13	mpm multi	on	off	20	10	angepasster Geschiebegang
MK16	X	11	mpm multi	on	off	20	10	60 3

Tabelle 28: Einstellungen der endgültigen für die weitere Analyse verwendete BASEMENT - Simulation.

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Mpm-multi	13	130'000 m ³	50 % / 50 %	60	3

Tabelle 29: Ausgangseinstellungen der Simulation zur Verdeutlichung der Sensitivität der endgültigen Ablagerungshöhen auf ausgewählte Simulationseinstellungen.

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Rickenmann	10	170'000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	70 (Nitsche et al. 2011)	0.02

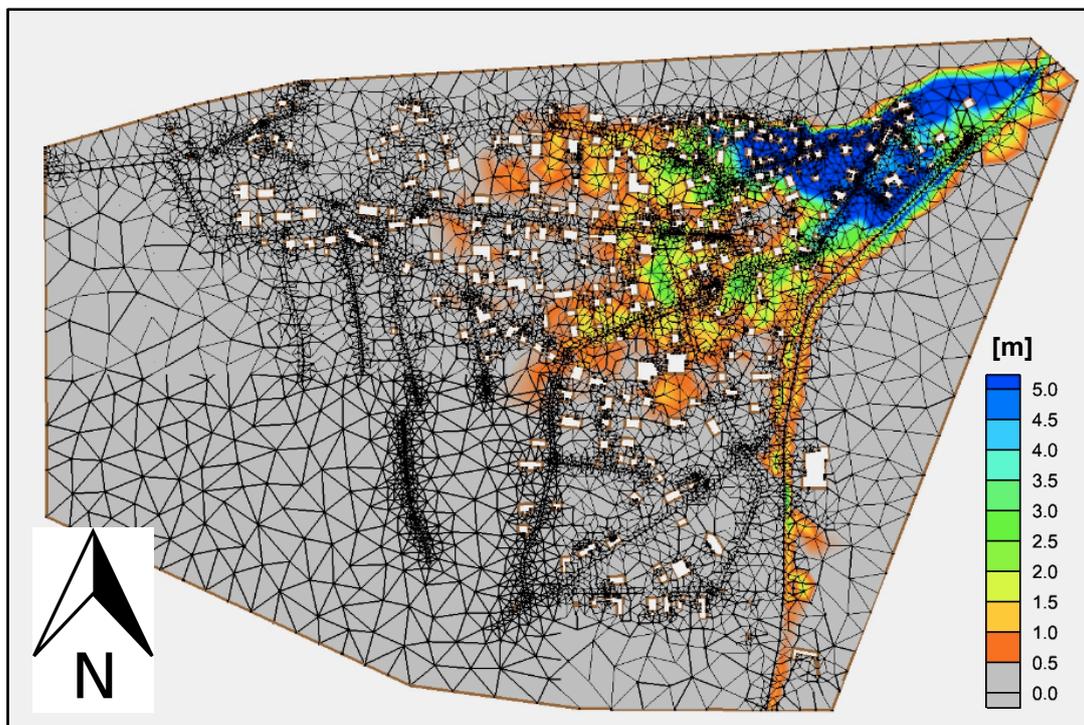


Abbildung 84: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 29.

Tabelle 30: Variierte Transportformel (Mpm - multi) in rot markiert.

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Mpm-multi	10	170'000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	70 (Nitsche et al. 2011)	0.02

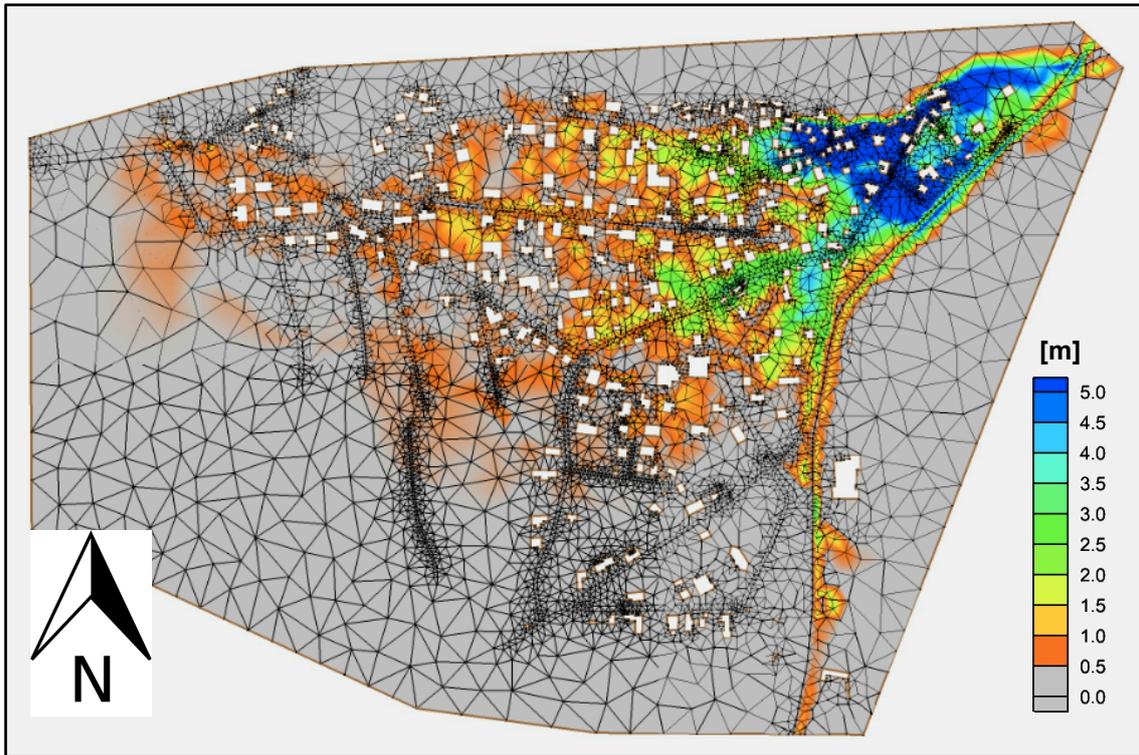


Abbildung 85: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 30.

Tabelle 31: Variierter Transportfaktor (rot markiert).

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Rickenmann	13	170'000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	70 (Nitsche et al. 2011)	0.02

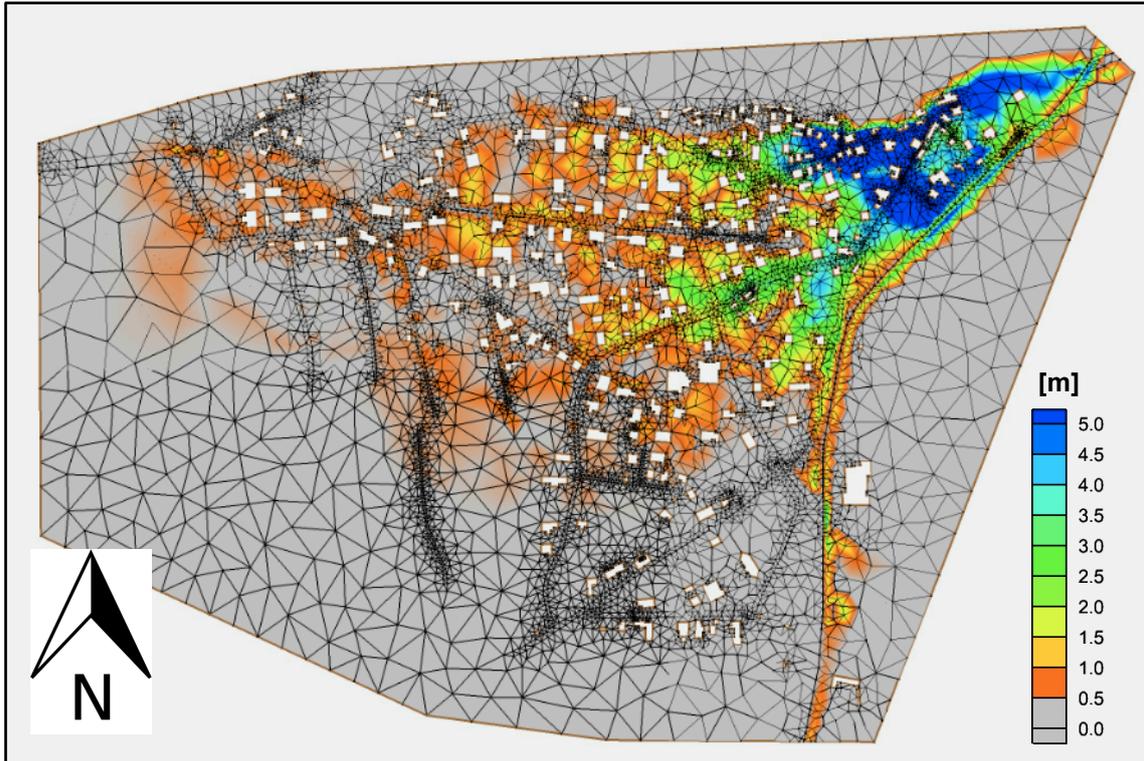


Abbildung 86: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 31.

Tabelle 32: Variierte Feststoffkubatur (rot markiert).

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Rickenmann	10	130'000 m ³	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	70 (Nitsche et al. 2011)	0.02

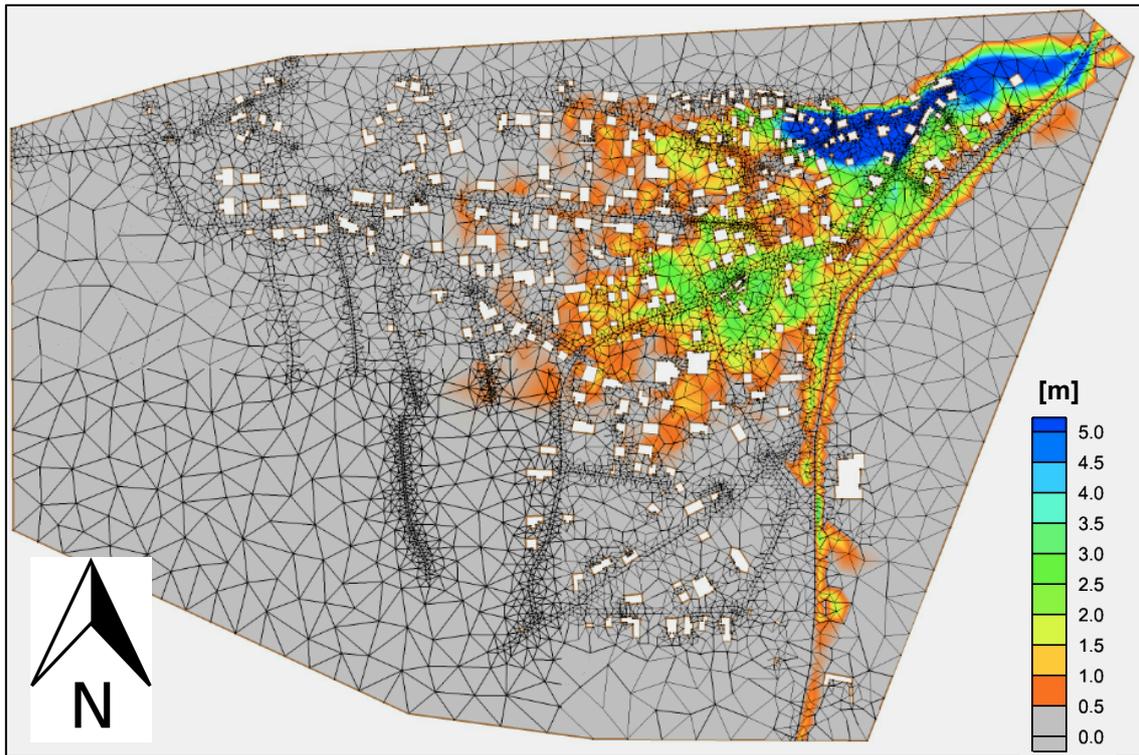


Abbildung 87: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 32.

Tabelle 33: Variierter Anteil Geschiebe/Feinanteile (rot markiert).

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D ₅₀ [mm]	D _{fein} [mm]
Rickenmann	10	170'000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	50% / 50 %	70 (Nitsche et al. 2011)	0.02

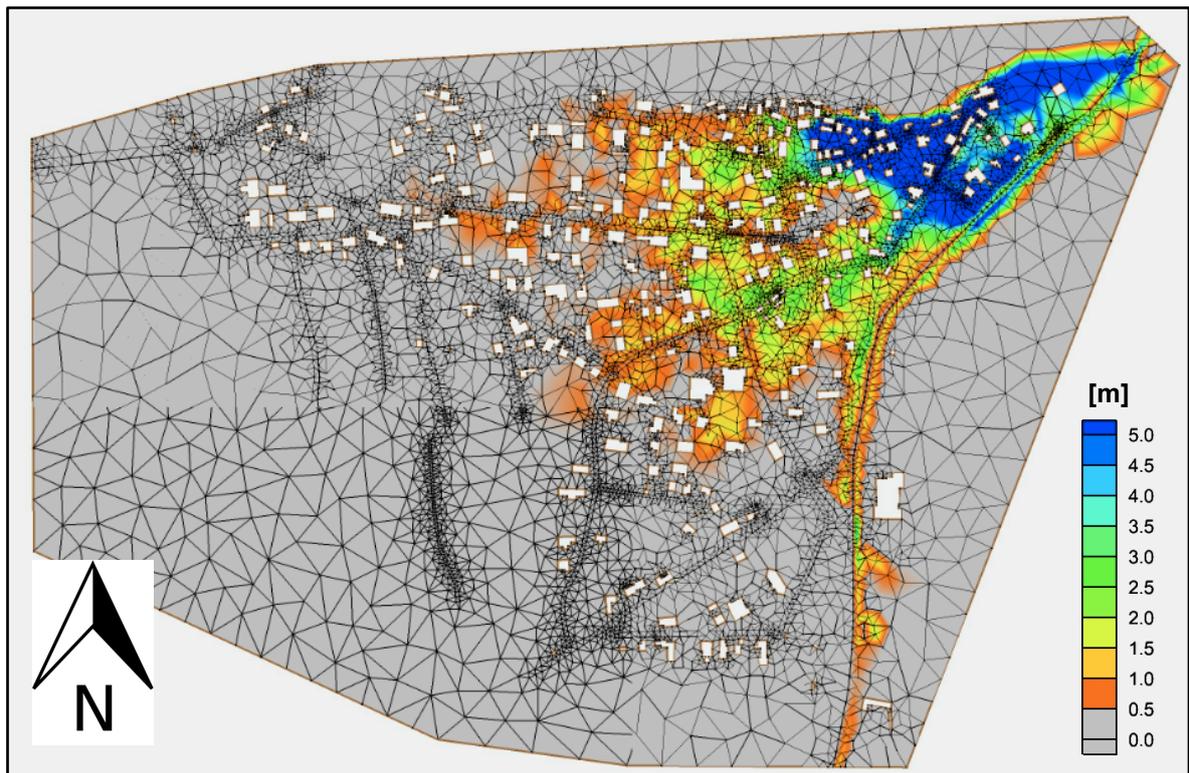


Abbildung 88: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 33.

Tabelle 34: Variierter Korndurchmesser D_{50} (rot markiert).

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D_{50} [mm]	D_{fein} [mm]
Rickenmann	10	170`000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	60	0.02

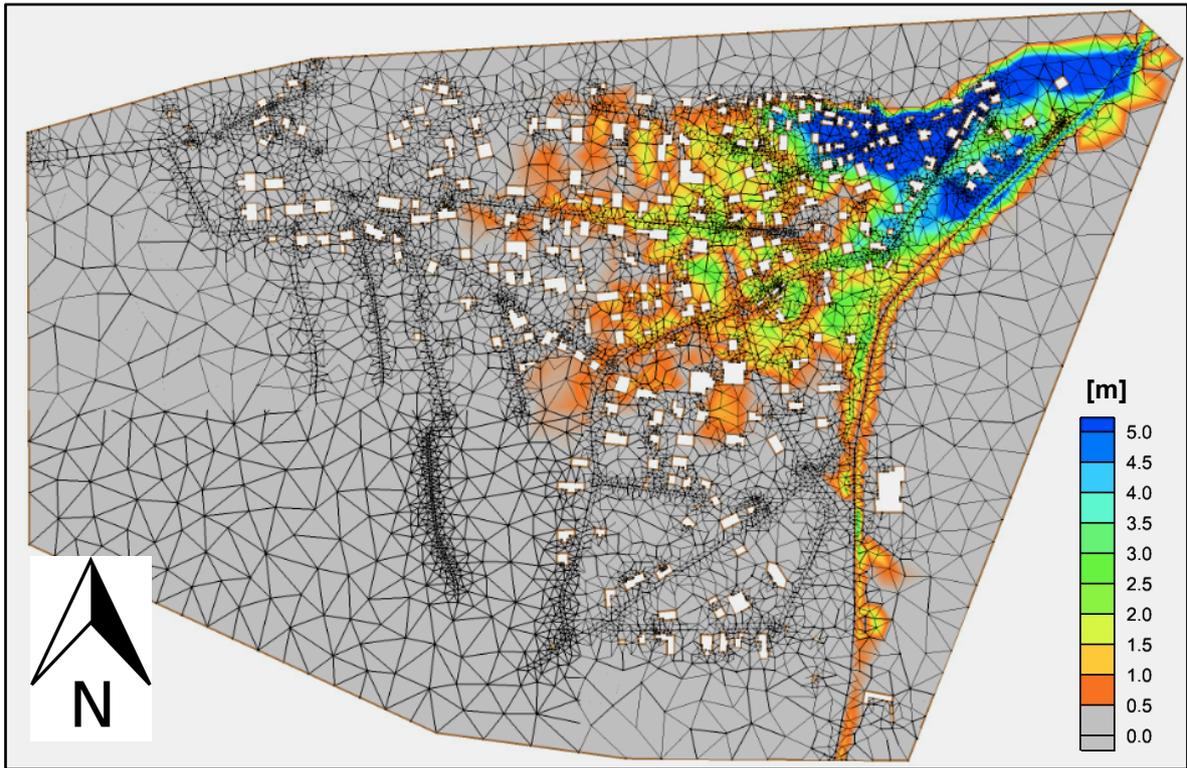


Abbildung 89: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 34.

Tabelle 35: Variierter Korndurchmesser D_{fein} (rot markiert).

Transportformel	Transportfaktor	Feststoffkubatur	Anteil Geschiebe/Feinanteile	D_{50} [mm]	D_{fein} [mm]
Rickenmann	10	170`000 m ³ (Biaggi und Zumstein 2001)	53% / 47 % (Biaggi und Zumstein 2001)	70	3

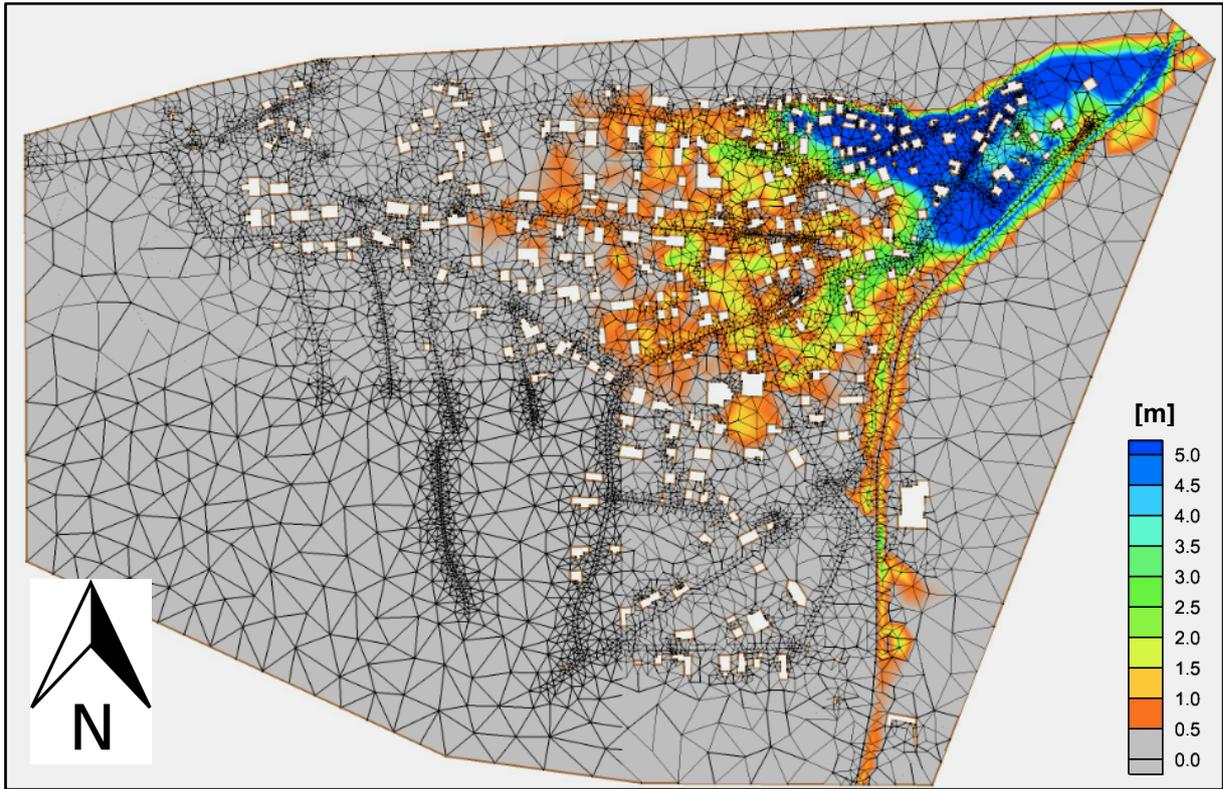


Abbildung 90: Endergebnis der Ablagerungshöhen mit den Simulationseinstellungen aus Tabelle 35.

Tabelle 36: Gegenüberstellung der anhand von Kalibrierungsphotos abgeschätzten Ablagerungshöhe und der mit BASEMENT simulierten Ablagerungshöhe. Bei mit einem + markierte Differenzen ist die simulierte Ablagerungshöhe grösser als die abgeschätzte, bei einem – ist sie kleiner. (Photograph aller Photos unbekannt. Die Tabelle wird auf den folgenden zwei Seiten fortgesetzt).

Kalibrierungs-photo	Kalibrierungs-photo [Nr.]	Abgeschätzte Ablagerungshöhe [m]	Ablagerungshöhe Simulation [m]	Differenz [m]
	1	2.40	2.46	+ 0.06
	2	4.00	3.97	- 0.03
	3	2.50	1.83	- 0.67
	4	2.00	1.26	- 0.74
	5	2.60	2.66	+ 0.06

Kalibrierungs-photo	Kalibrierungs-photo [Nr.]	Abgeschätzte Ablagerungshöhe [m]	Ablagerungshöhe Simulation [m]	Differenz [m]
	6	2.30	2.20	-0.10
	7	1.00	1.00	+/- 0.00
	8	0.15	0.14	- 0.01
	9	0.15	0.55	+0.40
	10	0.50	0.64	+0.14
	11	3.30	2.74	- 0.56

Kalibrierungs-photo	Kalibrierungs-photo [Nr.]	Abgeschätzte Ablagerungshöhe [m]	Ablagerungshöhe Simulation [m]	Differenz [m]
	12	1.20	1.28	+ 0.08
	13	1.10	1.11	+0.01
	14	3.50	3.67	+0.17
	15	1.50	1.47	-0.03

Eine detaillierte Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Intensitätswerte Ablagerungshöhe, Fließtiefe und -geschwindigkeit für jeden simulierten Zeitschritt und jedes untersuchte Gebäude wurde aus Gründen des Papierverschleisses nicht gedruckt. Die Daten finden sich stattdessen auf der beigegeführten Daten-CD und können dort eingesehen werden.

Persönliche Erklärung

Persönliche Erklärung: Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Zürich, 26.09.2014

Martin Seiler