

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Titels

„Diplomingenieur für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft“

Felsstürze

Beiträge zur ihrer Simulation

Februar 2004



im Rahmen des Projektes

„Felssturzgefahr B308 Oberjochstraße“

(Deutschland)

Diplomand: Christof Kuhn

Betreuer: Univ.Prof. Dr. J.F. Schneider

1. Abstract

Für die Risikoabschätzung in Gebirgsgegenden wurden bisher zahlreiche Ansätze gefunden, die Dynamik von Felsstürzen zu modellieren, insbesondere was die Reichweite, aber auch die Geschwindigkeiten, Sprunghöhen und Energien betrifft. Ein künstlicher Felsabtrag (Hauptdolomit) am Oberjoch im deutschen Allgäu im Jahr 2000 bot sich an, die auftretenden Felsstürze mit Videokameras zu dokumentieren und dadurch Angaben über die oben genannten Kennwerte zu erhalten (ein Videofilm liegt dieser Arbeit als DVD-ROM bei). Typische Blöcke hatten Massen von wenigen Tonnen, der Maximalwert betrug etwa 200t. Ihre Reichweiten auf einer Böschung von 35° bis 37° betragen nach einer Fallhöhe von bis zu 50m etwa 130m, in Ausnahmefällen bis zu 200m. Typische Geschwindigkeiten auf der Schutthalde betragen 10 bis 20m/s, Ausreißer erreichten bis zu 35m/s. Die Sprunghöhen überschritten selten 4m. Meistens betragen die Blockenergien 100kJ bis 1000kJ, selten bis 10.000kJ. Bemerkenswerterweise erreichten rollende Einzelblöcke größere Reichweiten, als wenn eine größere Felsmasse (einige 100m³ bis wenige 1000m³) gleichzeitig auf die Sturzhalde fiel. Weiters zeigte sich eine unerwartet gute Kornsortierung innerhalb der Sturzhalde.

Die Felddaten wurden mit den Ergebnissen von drei Simulationen verglichen: Der geometrische Ansatz der "Mittleren Neigung der Sturzbahn" und zwei dynamische Ansätze – das Computerprogramm "ROFMOD3" der Fa.GEOTEST (Schweiz) und "CRSP3" vom Colorado Dept. of Transportation (USA). Auffällig war, daß die Reichweite empfindlich auf die Veränderung der gewählten Parameter innerhalb plausibler Werte reagierte, während die Geschwindigkeiten eher unempfindlich waren und besser mit den Beobachtungen übereinstimmten. Berücksichtigt man die Unsicherheiten bei den Böschungsparametern, erscheint bezüglich der Reichweiten die Leistungsfähigkeit des geometrischen Verfahrens nicht wesentlich geringer als die der dynamischen Ansätze.

In order to assess rockfall hazards in mountainous regions, a number of methods have been found to model the dynamics of rockfalls. Emphasis was put on predicting the run out distance; further considerations included block velocities, bounce heights and block energies. Artificial removal of a rock face (dolostone) carried out near Oberjoch in southern Germany in the year 2000 provided the opportunity of filming the rockfalls and finding information about the attributes mentioned above (a video film in form of a DVD-ROM is included as part of this thesis). Typical rock blocks weighed a few tons, with a maximum of about 200 t. After a free fall of some 50 m, the rolling blocks covered distances of about 130 m on a 35° to 37° slope, with exceptional maxima of 200 m. The rolling blocks reached velocities of 10 to 20 m/s, with a maximum of 35 m/s. Bounce heights rarely exceeded 4 m. In most cases, block energies varied between 100 kJ and 1000 kJ, occasionally reaching over 10.000 kJ. A remarkable observation was that single blocks covered larger run out distances than larger masses of rock (several 100 m³ to few 1000 m³) falling on the talus slope simultaneously. Moreover, the rate of grain sorting in the talus slope proved more important than expected.

The observed quantities were compared to the results of three simulation models: the geometric concept of the "shadow angle" and two dynamic concepts – the computer program "ROFMOD3" of GEOTEST (Switzerland) and "CRSP3", developed at the Colorado Dept. of Transportation (USA). Variation of the parameters chosen had a considerable impact on the calculated run out distances, whereas the block velocities were rather stable and fitted well with the observations. Considering the uncertainties in the slope parameters chosen, the performance of the computer simulations was not much better than that of the simple geometric model.

2. Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des Projekts "Georisk" des Bayrischen Geologischen Landesamts durchgeführt, das die Erfassung und Bewertung von Naturgefahren in Bayern zum Ziel hat, sowie Vorschläge zur Lösung damit verbundener Problemstellungen. In diesem Projekt nahm die "Felssturzgefahr B308 Oberjochstraße" einen Teil ein.

Von April bis August 2000 wurde eine Felspartie am Kleinen Jochschrofen (Oberjoch, Gem. Hindelang, Oberallgäu) durch mehrere Sprengungen entfernt, da sie eine Gefährdung für die unmittelbar darunter vorbei führende B308 darstellte. Die Sprengungen verursachten jeweils Felsstürze, die zur Dokumentation der auftretenden Felssturzphänomene mittels Videokameras herangezogen werden konnten. Da natürliche Felsstürze so selten auftreten, daß sie in den seltensten Fällen beobachtet oder gar gefilmt werden können, bot sich der künstliche Felsabtrag für diese Zwecke an.

Ein Film über die Felsstürze wurde im Zuge der Diplomarbeit erstellt und liegt dieser Arbeit als DVD-ROM bei.

3. Danksagung

Meine besondere Dankbarkeit gilt zunächst meinem Betreuer Univ.Prof.Dr.Schneider, der mir diese Arbeit ermöglichte und mir eine ganze Reihe von Hilfestellungen gab, weiters Dr. von Poschinger vom Geologischen Landesamt in München, der die geologische Gesamtleitung innehatte und mir entscheidende Unterlagen und Hinweise zur Verfügung stellte, sowie dem Straßenbauamt Kempten und der Fa. Gasser / BATI-Group, die mir trotz des Zeitdrucks sehr kooperativ zur Seite standen. Außerdem möchte ich der Fa.GEOTEST in Horw / Luzern (CH) herzlich dafür danken, ihr Programm benutzen zu dürfen und wichtige Hinweise darüber erhalten zu haben. Dem Staat Bayern möchte ich für die Finanzierung der ersten Phase herzlich danken. Dipl.Ing. Bernhard Hösle vom Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Univ. f. Bodenkultur Wien hat mir wichtige Hilfestellungen für die Steinschlagkartierung zuteil werden lassen.

Reinhard Lorenz vom Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Univ. f. Bodenkultur Wien hat keine Mühen gescheut, um die Sprengungen zu filmen und damit eine wichtige Grundlage für die Auswertung der Felsstürze zu geben, sowie aus dem gesammelten Filmmaterial mit seinem Kollegen Karl Gruber einen ansprechenden Dokumentationsfilm über die Arbeiten zu erstellen, der Teil dieser Diplomarbeit ist.

Nicht zuletzt habe ich besondere Dankbarkeit gegenüber meinen Eltern, die meine Arbeiten ideell und finanziell unterstützten, und meinen Freunden und Kollegen an der Universität, die mir immer wieder neue Anregungen geben konnten.

1. Abstract.....	2
2. Vorwort.....	3
3. Danksagung.....	3
4. Aufgabenstellung.....	7
5. Allgemeines über Felsstürze.....	7
5.1. Definitionen.....	7
5.2. Bisher beobachtete Phänomene bei Felsstürzen.....	13
5.3. Bisher entwickelte Simulationsprogramme	15
6. Überblick über das Abbauprojekt.....	16
6.1. Lage und Geologie des Projektgebiets	16
6.2. Vorgangsweise beim Abbau.....	20
6.3. Endzustand nach Fertigstellung.....	23
7. Angewendete Untersuchungsmethoden	24
7.1. Kartierung	25
7.2. Photographie	25
7.3. Aufzeichnung auf Videoband, Vermessung	26
7.4. Simulationsmodelle.....	27
7.4.1. Ansatz der "Mittleren Neigung des Sturzhanges" (MNS).....	27
7.4.2. ROFMOD 3 (Fa. Geotest AG, Schweiz)	28
7.4.3. CRSP3 (Colorado Dept. of Transportation, USA)	29
7.4.4. Vergleich der Simulationsmodelle	32
8. Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten	33
8.1. Kartierung	33
8.1.1. Geologie und Geomorphologie des Arbeitsgebiets	33
8.1.2. Kartierung der Schutthalde	36
8.1.3. Quellkartierung	37
8.2. Visuelle Beurteilung der Felsstürze (Photos, Video).....	38
8.3. Resultate nach der "Mittleren Neigung des Sturzhanges".....	41
8.4. Resultate nach ROFMOD 3.....	42
8.5. Resultate nach CRSP3	43
9. Diskussion der Ergebnisse.....	46
10. Ausblick	47

11. Literaturverzeichnis	49
12. Anhang.....	52
12.1. Profilschnitte.....	52
12.2. Beobachtete Reichweiten.....	54
12.3. Simulationsergebnisse.....	54
12.4. Karten	61
12.5. Videofilm über die Abtragsarbeiten auf DVD-ROM	61
Tabelle 1: Simulierte und beobachtete Geschwindigkeit in Höhe der B308.	42
Tabelle 2: Nach ROFMOD3 simulierte und beobachtete Reichweiten und Sprunghöhen.....	43
Tabelle 3: Nach CRSP3 simulierte und beobachtete Blockdaten, Sprengung vom 26.4.00. ...	45
Tabelle 4: Nach CRSP3 simulierte und beobachtete Blockdaten, Sprengung vom 24.6.00. ..	45
Abb. 1 Auftretende Größen beim Gleiten. Graphik des Autors.	8
Abb. 2 Auftretende Größen beim Fallen. Graphik des Autors.	8
Abb. 3 Auftretende Größen beim Springen. Graphik des Autors.....	9
Abb. 4 Auftretende Größen beim Rollen. Graphik des Autors.	9
Abb.5 Vergleich „geometrisches Gefälle“ (gerade) zu „Fahrböschung“ (krumm).	10
Abb. 6 Vergleich „geometrisches Gefälle“ zu „Schattenwinkel“.	11
Abb. 7 Bereiche unterschiedlicher Bewegungsformen	14
Abb. 8 Überblickskarte. Oberjoch (Pfeil) liegt an der Staatsgrenze östlich von Sonthofen. ...	16
Abb. 9 Detailkarte Oberjoch mit Kleinem Jochschrofen (Pfeil).	17
Abb. 10 Geologisches Profil zwischen Jochschrofen (SE) und Spieser (NW)	18
Abb. 11 Jochschrofen Gesamtansicht von Süden.	18
Abb. 12 Kleiner Jochschrofen von der B308 vor Abbaubeginn.....	19
Abb. 13 Abbau in Terrassen, Blick von Osten.	21
Abb. 14 Bedeckte B308 von Westen, links die alte Schutthalde.....	21
Abb. 15 Die Sturzhalde vom Schrofen.	22
Abb. 16 Endzustand Kl.Jochschrofen.	23
Abb. 17 Zustand der Halde im August 2000.	24
Abb. 18 Energierestitution beim Aufprall	31
Abb. 19 Der Hauptturm von der Kanzel aus, die Hauptkluft hinter dem „Bankerlturm“	33
Abb. 20 Klufftrose Kleiner Jochschrofen, 1060 bis 1100m.	34
Abb. 21 Klufftrose Kl. Jochschrofen auf 1140m.	34

Abb. 22 Dunkler Kalk, von Hauptdolomit diskordant überlagert.	35
Abb. 23 Die Halde zu Beginn der Arbeiten. Rechts ein Block von etwa 1000t.....	36
Abb. 24 Schutzgraben und –wall von Westen aus.	37
Abb. 25 Schrofen und Halde im Profil von W (Kellerwand).	38
Abb. 26 Einzelblock von etwa 20t, der bis zur Höhe 978m gerollt ist.	40
Abb. 27 Am 24.Juni rollte ein Block von etwa 200t bis in den Graben.	40
Abb. 28 Die von der Straße abwärts beförderte Schutthalde im August.	41
Abb. 29 Profil Kleiner Jochschrofen hinter dem Hauptturm.....	52
Abb. 30 Geplanter Abbau, Spalten schematisch.	54
Abb. 32: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: April 2000	54
Abb. 33: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: Mai 2000	55
Abb. 34: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: Juni 2000	55
Abb. 35: Ergebnis nach ROFMOD3 26.4.00. realistische Werte.....	56
Abb. 36: Ergebnis nach ROFMOD3 26.4.00. manipulierte Werte	57
Abb. 37: Ergebnis 26.4.00. nach CRSP3.....	58
Abb. 38: Ergebnis 24.6.00. nach CRSP3, Block 1,4t	59
Abb. 39: Ergebnis 24.6.00. nach CRSP3, Block 200t	60
Abb. 40: vom Verfasser verbessertes DHM mit Situation, Bachläufen und Paßpunkten.....	61
Abb. 41: ursprüngliches DHM der TU München, Details des Schrofens	61
Abb. 42: vom Verfasser verbessertes DHM: Detail des Schrofens mit Störungen.....	61
Abb. 43: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte April	61
Abb. 44: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende April.....	61
Abb. 45: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte Mai	61
Abb. 46: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende Mai.....	61
Abb. 47: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte Juni	61
Abb. 48: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende Juni.....	61

4. Aufgabenstellung

Ziel der ersten Phase der Arbeiten war die Dokumentation des Abbauprojektes und der damit verbundenen Felsstürze, während das Ziel in der zweiten Phase darin bestand, die mechanisch relevanten Parameter beim Abgang eines künstlich ausgelösten Felssturzes zu erheben sowie zu bewerten. Insbesondere galt es zu ergründen, welche Reibungs- und Dämpfungseffekte die Lockergesteinsüberdeckung im Sturzraum zu entwickeln vermag. Die Informationen sollten sowohl dazu dienen, die auftretenden Mechanismen zu dokumentieren, als auch sie für die Modellierung von zukünftigen Ereignissen aufzubereiten. Insbesondere sollten Verbesserungsmöglichkeiten für existierende Simulationsmodelle aufgezeigt und Grundlagen für neue geschaffen werden. Die dadurch gewinnbaren Erkenntnisse sind für die Raumplanung, Gefahrenraumbewertung und Bemessung von Schutzbauwerken von großer Wichtigkeit, wie sich in der Vergangenheit schon oft an Ereignissen mit großen Schäden an Menschen und Sachen gezeigt hat.

5. Allgemeines über Felsstürze

5.1. Definitionen

? Ein **Felssturz** ist die schnelle (Dauer: wenige Sekunden bis maximal Minuten) Abwärtsbewegung von Fels- oder grobkörnigen Lockergesteinsmassen, die ein Volumen zwischen $0,1 \text{ m}^3$ und $1,000.000 \text{ m}^3$ aufweisen (oder eine Fläche von kleiner als 10 ha bedecken) und bei der Bewegung zumindest zeitweise den Bodenkontakt verlieren (ABELE, 1974, S.4f.). Die genannten Zahlen sind jedoch nur grobe Richtlinien. Maßgeblich für einen Felssturz muß nämlich die Interaktion Block – Boden sein, die Gesteinsmassen dürfen nicht in Kontakt bleiben (man spräche sonst von einem Schußstrom oder Sturzstrom (HEIM, 1934, S.84; ABELE, 1974, S.4f.)). Weiters muß der Wassergehalt von vernachlässigbarer Bedeutung sein. Bei kleineren Massenbewegungen spricht man übrigens von Steinschlag, bei größeren von Bergsturz, wo die Interaktion Block – Block die Hauptbedeutung hat, wie es auch bei Schußströmen der Fall ist. Bei Bewegungen unter Beteiligung von Wasser spricht man z.B. von Muren. Die Geschwindigkeit und damit auch die Reichweite sowohl von Bergstürzen als auch nassen Massenbewegungen kann beträchtlich größer sein als die von Felsstürzen, da bei beiden ein Fließen oder gar Schießen auftritt.

? Folgende **Bewegungen** treten bei einem Felssturz auf:

- **Gleiten:** Reine Translation mit durchgehendem Bodenkontakt ohne Rotation. Vor allem am Beginn und am Ende der Bewegung. Maßgeblich sind die Haftreibung bzw. Gleitreibung sowie die Hangneigung (vgl. Abb. 1).

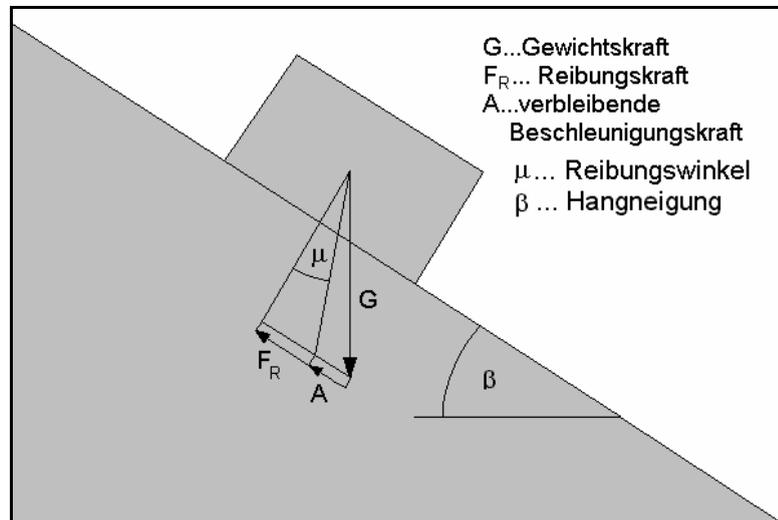


Abb. 1 Auftretende Größen beim Gleiten. Graphik des Autors.

- **Fallen:** Lotrechte oder parabelförmige Bewegung ohne Bodenkontakt. Tritt bei Steilstufen und Wänden auf. Unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes läßt sich die Flugbahn unter Kenntnis der Anfangsgeschwindigkeit (horizontal und vertikal) exakt vorhersagen (vgl. Abb. 2). Die Berücksichtigung des Luftwiderstandes liefert geringere Reichweiten, wir liegen daher auf der sicheren Seite. Unter Fallen i.w.S. verstehen ERISMANN & ABELE (S.177, 2001) auch die Bewegung entlang einer steilen (etwa $> 45^\circ$) Böschung, da dort die Blockbeschleunigung nicht nennenswert geringer ist als im freien Fall.

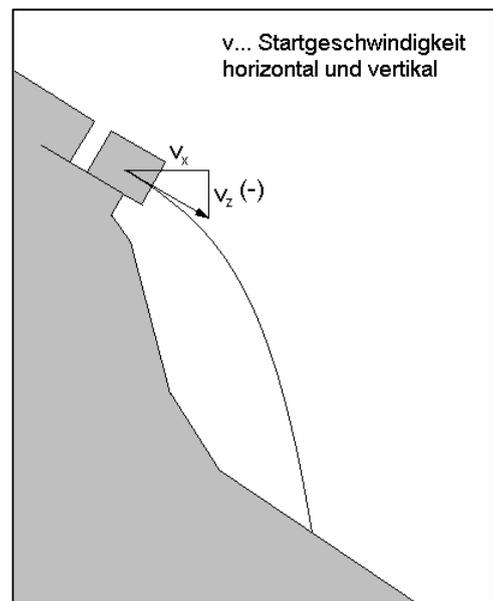


Abb. 2 Auftretende Größen beim Fallen. Graphik des Autors.

- **Springen:** Abfolge von Bewegung ohne Bodenkontakt (Parabelflug) und kurzem Aufprallen am Boden. Tritt meist nach dem ersten Aufprall eines frei fallenden Blockes und bei der Überwindung von Hindernissen und Stufen auf. Dabei wird der

Block meist in Rotation versetzt. Die Blockenergie wird bei jedem Aufprall in Rotationsenergie und Verformungsenergie umgewandelt, was den Block bremst (vgl. Abb. 3). Beim ersten steilwinkligen Aufprall aus freiem Fall wird meist ein Großteil (75% bis 85%) der Bewegungsenergie in Verformungsenergie (Deformation des Untergrunds und / oder des Blocks) umgewandelt (BROILLI, 1974, S.74). Die maßgeblichen Größen beim Springen sind die Blockgeometrie (Ausrichtung meist nach derjenigen Rotationsachse, die das größtmögliche Rotationsmoment aufweist, ZINGGELER 1989, S.45, AZZONI, 1991, S.310), die Böschungsneigung, die Dämpfungseigenschaften der Böschung, die Böschungsrauigkeit und die vorherrschenden Korngrößen in der Böschung (AZZONI, 1991, S.310).

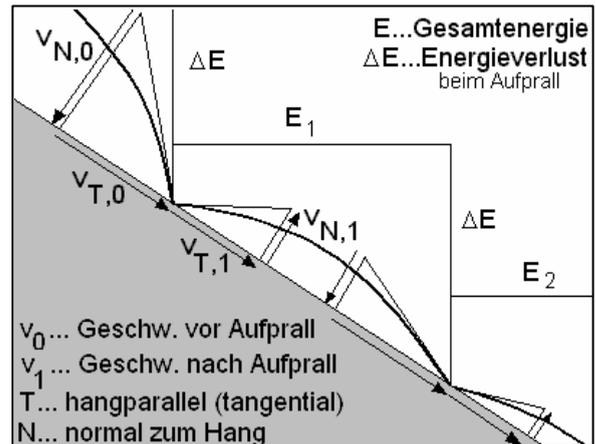


Abb. 3 Auftretende Größen beim Springen. Graphik des Autors.

- **Rollen:** Abwärtsbewegung mit überwiegend Bodenkontakt und Rotation, wobei die Umfangsgeschwindigkeit des Blocks ähnlich der Translationsgeschwindigkeit ist. Tritt meist gegen Ende der Sturzbewegung auf, sobald die Rotationsbeschleunigung abgeschlossen ist und keine Hindernisse den Block zum erneuten Springen veranlassen. Jedenfalls muß die Böschungsneigung geringer als 45° (100%) sein (JOHN & SPANG, 1979, S.4). Maßgebliche Größen wie beim Springen (Abb. 4).

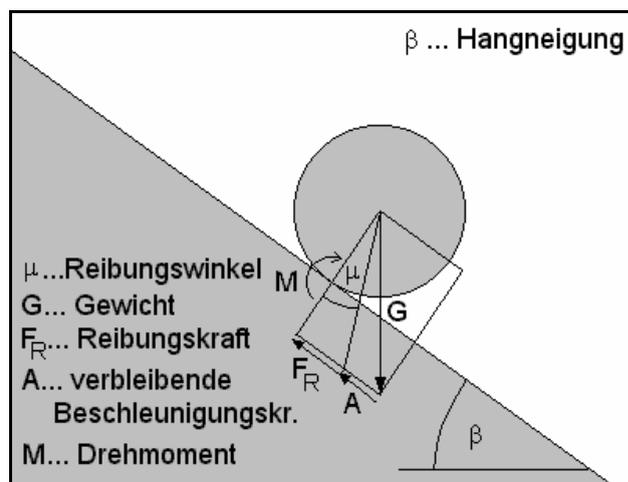


Abb. 4 Auftretende Größen beim Rollen. Graphik des Autors.

- Diese Bewegungsarten treten oft kombiniert auf, also z.B. Springen mit gleitender Komponente, Rollen mit flachen Sprüngen, Rollen mit Gleiten – das erschwert die genaue Modellierung. ZINGGELER (1989, S.47) schlägt vor, daß Rollen i.w.S. dann vorliegt, wenn eine Bewegung ohne Bodenkontakt kürzer ist, als der Block für eine vollständige Rotation braucht. Kann sich also der Block während eines Sprunges mehr als einmal um seine Achse drehen, liegt Springen i.e.S. vor. Dies ist insofern plausibel, als ein von der Kugelgestalt abweichender Block hauptsächlich über die Kanten rollt und daher zwischen den Kanten die Belastung bis auf 0 heruntergehen kann – der Block verliert kurz den Bodenkontakt. Spätestens jedoch die nächste Kante schlägt wieder am Boden auf.
- ? Unter **geometrischem Gefälle** versteht man den Quotienten aus dem Vertikalabstand von Startpunkt (Oberkante der Felsmasse) und Endpunkt der Blockbewegung (Unterkante der Felsmasse) und deren Horizontalabstand (HEIM, 1932, S.113).

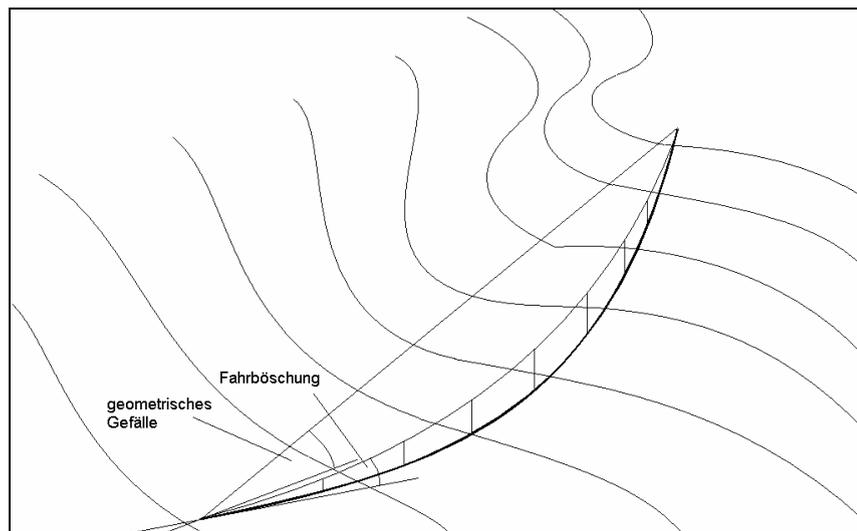


Abb.5 Vergleich „geometrisches Gefälle“ (gerade) zu „Fahrböschung“ (krumm). Graphik des Autors.

- ? Der Begriff **Fahrböschung** (HEIM, 1932, S.113) berücksichtigt dagegen die Tatsache, daß stürzende Blöcke oft seitliche Abweichungen von der Geraden vollführen (vgl. Abb.5). Der resultierende Horizontalabstand ist daher meist größer und die Fahrböschung kleiner oder gleich dem geometrischen Gefälle (ABELE, 1974, S.44). Die Fahrböschung nimmt dabei typischerweise Werte zwischen 60% und 90% an (also Winkel zwischen 30° und 42°). MEISSL (1998, S.60) gibt für die Bayrisch-Tiroler Kalkalpen eine durchschnittliche Fahrböschung von 78% (also 38°) an, 60% wird selten unterschritten.

- ? LIED (1977) und EVANS & HUNGR (1988, S.685f.) versuchten zu berücksichtigen, daß (siehe "Springen") der Großteil der Blockenergie beim ersten Aufprall aus größerer Höhe verloren geht und daher der Ansatz des geometrischen Gefälles bzw. der Fahrböschung den Einfluß der Wandhöhe überschätzt. Deswegen führten sie die Größen **Schattenwinkel** bzw. **mittlere Neigung des Sturzhanges** (MNS) ein, der sich aus dem geometrischen Gefälle bzw. der Fahrböschung zwischen dem Punkt des ersten Aufpralls und dem Endpunkt der Bewegung ergibt (vgl. Abb. 6). Die MNS ist durchschnittlich 30° , EVANS & HUNGR (1988, S.686) geben die Untergrenze mit $27,5^\circ$ an, was jedoch nach MEISSL (1998, S.65) auch leicht unterschritten werden kann. Die durchschnittliche MNS ist in den Bayrisch-Tirolerischen Alpen nach MEISSL (1998, S.65) $29,5^\circ$. Das Konzept der MNS liefert nach MEISSL (1998, S.157) wesentlich bessere Resultate als das der Fahrböschung.

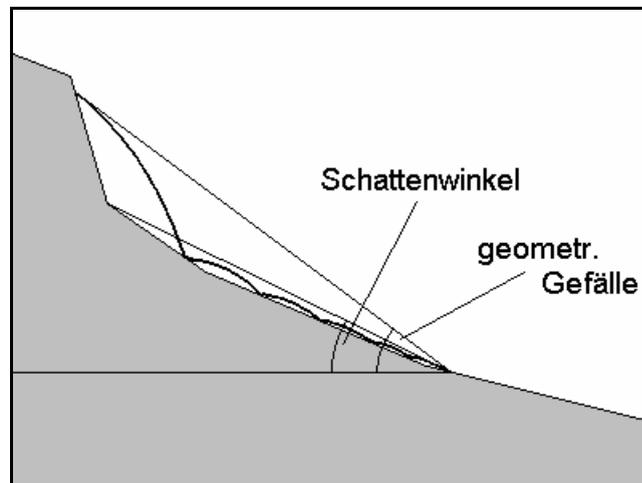


Abb. 6 Vergleich „geometrisches Gefälle“ zu „Schattenwinkel“. Graphik des Autors.

- ? Der früher häufig gebrauchte Begriff des **Pauschalgefälles** (SCHELLER, 1970) wurde in der Literatur vielfach uneinheitlich verwendet und sollte vermieden werden (MEISSL, 1998, S.55).
- ? Unter **dynamischem Rollreibungswinkel** φ_r versteht man jenen hypothetischen Böschungswinkel der Sturzbahn, bei dem der rollende Block weder beschleunigt noch verzögert wird (STATHAM, 1979). Er ist eine empirische Größe und kann nicht physikalisch hergeleitet werden – erfahrungsgemäß weist er Werte zwischen 45%, was 24° entspricht (ZINGGELER, 1989, S.49), und 80% auf, was knapp 39° entspricht (VAN DIJKE & VAN WESTEN, 1990, S.42). AZZONI & DE FREITAS (1995, S. 116) ermittelten je nach Lagerungsdichte einer Schutthalde Werte zwischen 55% und

75%, MEISSL (1998, S.145f.) fand einen Wert von etwa 57% (etwa $29,5^\circ$) für Schutthalden in den Bayrisch-Tiroler Kalkalpen für zutreffend. Der dynamische Rollreibungswinkel ist nur bei kugelförmigen Blöcken und glatter Böschung ident mit dem Schüttwinkel (SCHEIDEGGER, 1975, S.119f.). Bei kantigen Blöcken und rauhen Oberflächen, wie sie unter natürlichen Bedingungen vorliegen, ist der Schüttwinkel größer als der Rollreibungswinkel. Hervorzuheben ist, daß der Böschungswinkel der Schutthalde unabhängig von der Korngröße ist, was schon HEIM (1932, S.8) beobachtet hat. Dagegen ist der Rollreibungswinkel abhängig vom Verhältnis Durchmesser der Blöcke in der Böschung zu dem des Sturzblocks (STATHAM, 1979).

- ? Die **Rauhigkeit** ist ein physikalisch nicht unmittelbar faßbarer Parameter. Sie geht je nach Modellierungsansatz entweder als Rollreibungswinkel, als relativer Parameter, in Form geometrischer Winkel (siehe oben) oder als Abweichungen von der gedachten glatten Böschung (in Metern) in die Berechnung ein.
- ? Die **Dämpfung** beschreibt das Ausmaß, in dem ein Block beim Aufprall abgebremst wird. Der zugrundeliegende physikalische Parameter ist die **Energierestitution**, also der Anteil der Energie, der dem Block nach dem Aufprall verbleibt. Die Restitution kann in eine hangparallele (tangente) und normale Komponente zerlegt angegeben werden. Bei der tangentialen Restitution wird das Phänomen berücksichtigt, daß ein Block, dessen Umfangsgeschwindigkeit aufgrund Rotation noch geringer ist als seine Translationsgeschwindigkeit, beim Kontakt in schnellere Rotation versetzt wird. Diese Rotationsbeschleunigung geht aber zunächst mit teilweisem Gleiten einher – je höher die tangente Restitution, umso schneller erreicht der Block die erforderliche Rotationsgeschwindigkeit und umso mehr Translationsenergie wird verbraucht (SPANG & RAUTENSTRAUCH, 1988, S.1239). Bei geringer tangentialer Restitution (Block wird fast ohne Gleiten in Rotation versetzt) kann die normale Restitution sogar größer als 1 werden, da die tangente Geschwindigkeit über den Umweg der Rotationsbeschleunigung in normale Geschwindigkeit umgewandelt wird (AZZONI 1991, S.310). Während ein Block seine Umfangsgeschwindigkeit an seine Translationsgeschwindigkeit angleicht, nähert sich seine tangente Restitution 1 – er rollt satt über die Böschung hinweg (EVANS & HUNGR 1988, S.688). Andere Modelle berücksichtigen jedoch auch kompliziertere Ansätze bei der Modellierung der Dämpfung (z.B. Verformungsprozesse). Chau et al. (2002) untersuchten jüngst genauer den Einfluß der Geometrie auf die Restitution.

- ? Ein **Modell** ist ein subjektives Erkenntnisgebilde einer objektiven Realität (NINCK, 1994, S.36). Es kann daher immer nur ein Versuch sein, ein System zu beschreiben, was nie umfassend möglich ist und auch stets auf eine bestimmte Fragestellung, einen Ort und einen Zeitpunkt bezogen ist. Ein Modell im naturwissenschaftlichen Sinne versucht, einen Prozeß numerisch-physikalisch nachzuvollziehen.
- ? Ein **Simulationsmodell** versucht, ein Modell über den gegebenen Zeitpunkt hinaus, also auch auf künftige Ereignisse, zu erweitern. Dennoch bleibt es auf die angenommenen Rahmenbedingungen beschränkt (in unserem Falle z.B. auf Geologie, Klima).
- ? Ein **Computersimulationsprogramm** ist ein Werkzeug, mit dem unter Einsatz eines Computers aufgrund eines Simulationsmodells und eingegebener Parameter Vorhersagen über ein Ereignis automatisch getroffen werden können. Dabei ist entscheidend, daß die Ergebnisse nicht zuverlässiger sein können als das zugrunde liegende Simulationsmodell sowie die eingegebenen Parameter. Diese Wichtigkeit wird in der vorliegenden Arbeit noch beleuchtet werden.

5.2. Bisher beobachtete Phänomene bei Felsstürzen

Grundsätzlich läuft der Sturz eines Blockes (wie auch einer größeren Anzahl von Blöcken wie bei einem Felssturz) folgendermaßen ab: Ein Block rutscht aus dem Felsverband heraus (Bewegungsart: Gleiten), verliert bei ausreichendem Böschungswinkel den Kontakt zum Fels, fällt frei hinab (meist mit mehr oder weniger geringer Horizontalgeschwindigkeit und entsprechender Parabelflugbahn) und trifft auf einer Verflachung der Böschung zu Boden. Die gewonnene kinetische Energie wird innerhalb sehr kurzer Zeit in Deformationsenergie für Boden und Block umgewandelt, das heißt, daß der Untergrund eingedrückt wird, indem der Boden verdichtet, Bodenmaterial zur Seite geschoben oder gar geschossen wird, und daß Teile (besonders Ecken) des Sturzblocks abbrechen oder gar der ganze Block entlang von Klüften zerbricht. Der Energieverlust kann wie erwähnt (Kapitel 5.1) bis zu 85% betragen (BROILLI, 1974, S.74; vgl. Abb. 7). Zerbrechende Blöcke können bisher nicht befriedigend modelliert werden, die Simulation liegt aber auf der sicheren Seite (SPANG & RAUTENSTRAUCH 1988, S.1242). Findet der Block trotz des erzeugten Einschlagtrichters im Boden nicht genug Halt, beginnt er den Hang hinunterzurollen bzw. springt, wenn die verbleibende Horizontalgeschwindigkeit groß genug ist, über den Trichterrand hinweg. Dabei geht weitere Translationsenergie in Form von Reibung, Rotationsbeschleunigung und

Deformation des Untergrundes und / oder des Blockes verloren. Hindernisse und Stufen werden im Sprung überwunden, was der Bewegung erneute Dynamik verleihen kann. Schließlich wird der Block soweit gebremst, daß seine Bewegung von einem Hindernis oder der Dämpfung des Bodens gestoppt wird. Dabei erschwert die angesammelte Rotationsenergie den Bremsvorgang. Ist die Rotation durch eine ungünstige Blockgeometrie und der dadurch nötigen Hebelkraft zur Fortsetzung der Rotation (ZINGGELER, 1989, S.65f.) zum Erliegen gekommen, wird das letzte Stück Wegs durch Gleiten zurückgelegt.

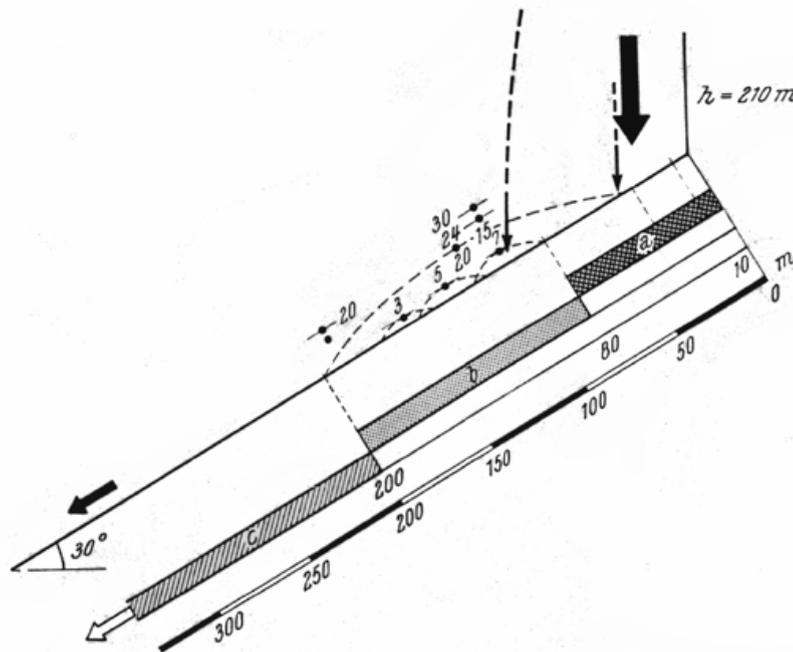


Abb. 7 Bereiche unterschiedlicher Bewegungsformen (Zone a: Aufschlag, b: Springen, c: Rollen). Aus BROILLI (1974, S.75).

Wegen des hohen Energieverlustes beim ersten steilwinkligen Aufprall auf nachgiebigen Boden wird offensichtlich, daß die Reichweite eines Blocks größer ist, wenn er früher aufschlägt (z.B. weil er in eine Rinne gefallen ist) und eine größere Höhe springend und rollend zurücklegen kann, als wenn er später aufschlägt und für das Springen und Rollen weniger Höhe verbleibt (EVANS & HUNGR, 1988, S.685f.). Daher erzielt der Ansatz des mittleren Neigung des Sturzhangs bessere Übereinstimmung mit der Realität (MEISSL, 1998, S.157).

Weiters ist für das Abbremsverhalten eines Sturzblockes das Verhältnis seines Durchmesser zu dem der in der Sturzbahn liegenden Blöcke (also die relative Rauigkeit) von großer Bedeutung (AZZONI, 1991, S.310, STATHAM, 1979). Ist ein Sturzblock wesentlich größer als die Blöcke in der Sturzbahn, rollt er glatt über die

Böschung hinweg, indem er die kleineren Blöcke und Steine durch seine große Masse wegdrückt. Die springende Phase wird daher bei großen Blöcken oft überschätzt (EVANS & HUNGR 1988, S.688). Hat er einen vergleichbaren Durchmesser, überträgt er einen beträchtlichen Teil seines Impulses auf die ruhenden Blöcke oder springt über sie hinweg, wenn sie sich ineinander verkeilen. Trifft aber ein Block auf einen wesentlich größeren ruhenden Block, wird die Bewegung meist abrupt gestoppt. Hinzu kommt noch der sogenannte "Siebeffekt", daß nämlich die Sturzblöcke in die "Löcher" zwischen größeren Blöcken hinein fallen und dort verbleiben (GERBER & SCHEIDEGGER, 1974, S.28f).

Das erklärt auch eine gute Sortierung nach der Korngröße, die bei Sturzhalden oft angetroffen werden kann – am Hangkopf die feinste Fraktion und am Hangfuß die größte, sofern nicht die Blöcke (aufgrund ihrer petrographischen Eigenschaften) beim Sturzprozeß immer mehr zerfallen. Dies hat schon HEIM (1932, S.8) erkannt. Neulich untersuchte PÉREZ (1998) beispielhaft die Struktur einer Schutthalde in Kalifornien.

5.3. Bisher entwickelte Simulationsprogramme

Mit unterschiedlichem kommerziellem Erfolg wurden bisher u.a. folgende Felssturzsimulationsprogramme entwickelt, die alle auf dynamischen Ansätzen beruhen:

- ? "SASS", BOZZOLO, 1987
- ? "CADMA", AZZONI et al., 1987 – 1995
- ? „ROCKFALL COMPUTER PROGRAM“, SPANG & RAUTENSTRAUCH, seit 1987
- ? EVANS & HUNGR, 1988
- ? "Colorado Rockfall Simulation Program" (CRSP), PFEIFFER et al. 1989-1990
- ? „ROFMOD“, ZINGGELER, Fa.Geotest, ab 1989
- ? "ROTOMAP", SCIOLDO, 1991
- ? "ROCFALL", STEVENS, 1998
- ? "MOBYROCK", ARTINI & PARONUZZI, 1999
- ? "PCMassi", BRUSCHI, seit 2000
- ? "STONE", GUZETTI et al., seit 2002 (Versuch, dynamische Verfahren flächig (GIS) anzuwenden)

Diese Programme arbeiten z.T. mit unterschiedlichen Ansätzen. ROCFALL und CRSP etwa arbeiten u.a. mit dem Restitutionsfaktor, ROFMOD versucht die Verformungsprozesse beim Aufprall im Detail zu berücksichtigen. Auf die quantitativen Unterschiede wird in Kapitel 8.3 ff. eingegangen.

6. Überblick über das Abbauprojekt

6.1. Lage und Geologie des Projektgebiets

Der Kleine Jochschofen liegt am Oberjoch in den Bayrischen Alpen und gehört zur Gemeinde Hindelang im Landkreis Oberallgäu, nahe der österreichischen Grenze zwischen Sonthofen und Reutte/Tirol (vgl.

Abb. 8). Der Ort Oberjoch ist mit 1140 m Seehöhe die höchstgelegene Dauersiedlung Deutschlands.

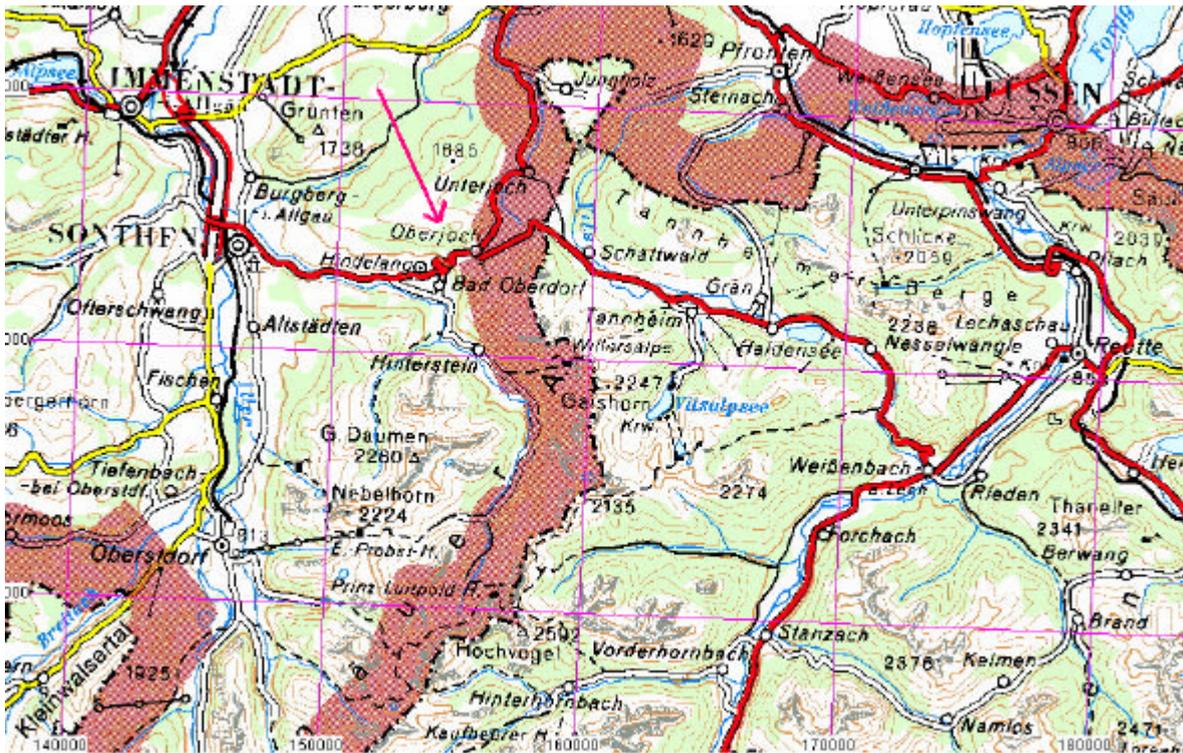


Abb. 8 Überblickskarte. Oberjoch (Pfeil) liegt an der Staatsgrenze östlich von Sonthofen. Die rote Straße von Sonthofen nach Oberjoch ist die B308.

Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, ÖK 500.

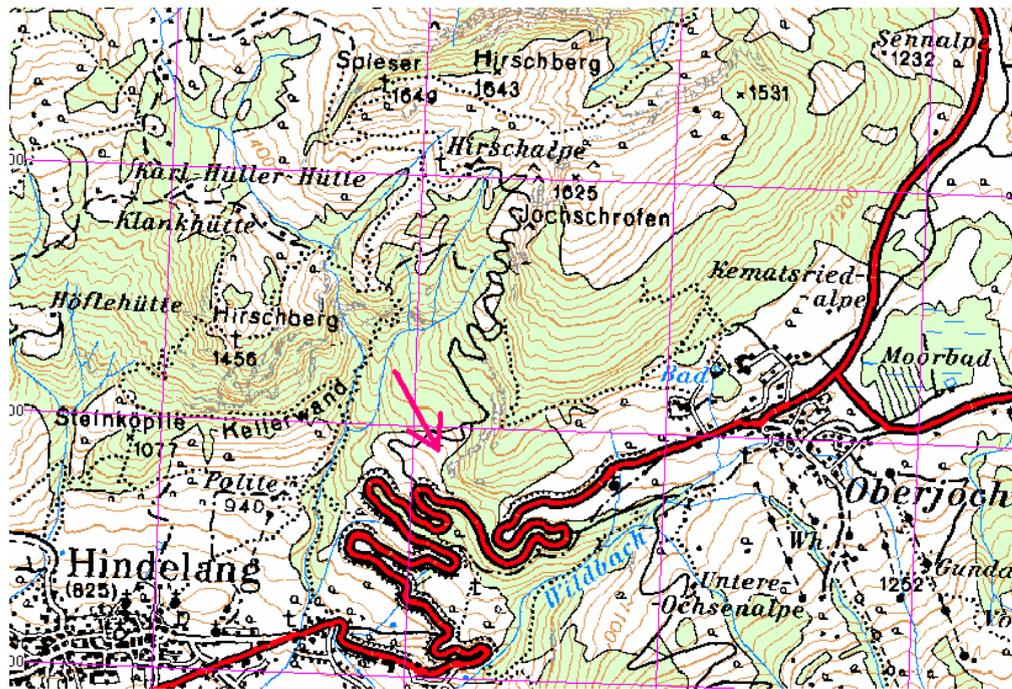


Abb. 9 Detailkarte Oberjoch mit Kleinem Jochschrofen (Pfeil), Quelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, ÖK 50.

Der Jochschrofen liegt an der Stirne der Nördlichen Kalkalpen (Oberostalpinere Deckenstapel), die sich hier in Inntaldecke (Tirolikum, weiter südlich anzutreffen), Lechtaldecke (Hochbajuvarikum) und Allgäudecke (Tiefbajuvarikum) aufgliedern. Die Lechtaldecke hat im Gebiet zwischen Hindelang und Füssen die Allgäudecke komplett überfahren, allerdings wurde die Allgäudecke später auf den äußersten Teil der Lechtaldecke (den Falkensteinzug, repräsentiert durch den Spieser und beide Hirschberge) aufgeschuppt und ein großer Teil der hangenden Lechtaldecke erodiert (SIMET & THOM, 1990, S.16). Der Jochschrofen gehört der Stirn der aufgeschuppten Allgäudecke (Jochschrofenschuppe) an und stellt eine mittelsteil nach Südosten bis Osten einfallende Hauptdolomitplatte (mittlere Obertrias) dar, die an ihrer Basis vereinzelt Raibl Formation (untere Obertrias) aufweist. Die Jochschrofenschuppe grenzt im Liegenden an die inverse Jochschrofen-Vorschuppe, die den Liegendschenkel der überkippten Stirnfalte der Allgäudecke darstellt. Die Jochschrofen-Vorschuppe wiederum lagert dem tektonisch eigentlich hangenden Falkensteinzug, also der Lechtaldecke, auf, die im Norden an das Randcenoman, das Ultrahelvetikum und die Flyschzone grenzt (SIMET & THOM, 1990, S.16; vgl. Abb. 10, Abb. 11).

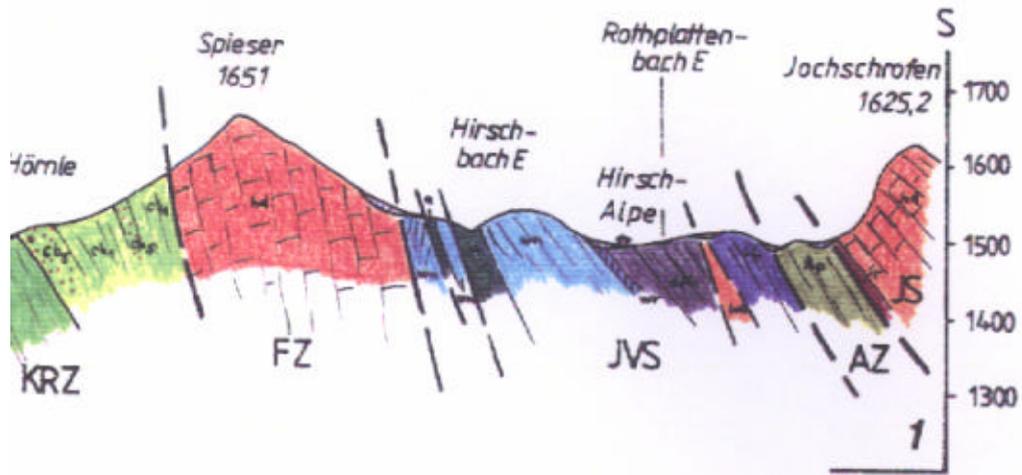


Abb. 10 Geologisches Profil zwischen Jochschrofen (SE) und Spiesser (NW) (JS=Jochschrofenschuppe, AZ=Arosazone, JVS=Jochschrofenvorschuppe, FZ=Falkensteinzug, KRZ=Kalkalpine Randzone; rot: Hauptdolomit und Raibl Formation, blau: Jura, grün: Kreide). Quelle: SIMET & THOM (1990, Anlage 3)



Abb. 11 Jochschrofen Gesamtansicht von Süden. In der Mitte die Dolomitplatte des Jochschrofens, die nach links oben aufgeschuppt wurde. An deren unterem Ende das Abbaugebiet (Kreis). Links der Spiesser. Aufnahme des Autors.

Auf ihrem Weg nach Norden hat die Allgäudecke Penninische und Unterostalpine Gesteine mitgerissen, die nun samt eingeschuppten oberostalpinen Gesteinen um Hindelang als Arosazone (nach einem Ort im Schweizerischen Graubünden) zutage treten. Diese liegt bei Oberjoch zwischen der Jochschrofenschuppe und der Jochschrofen-Vorschuppe eingeklemmt. Dadurch kommen unter der tektonisch reduzierten Raibl Formation des Jochschrofens penninische Kissenlaven (übrigens die einzigen Deutschlands) und "Couches Rouges" (rote Tonschiefer) zu liegen, wobei sich besonders letztere durch ausgeprägte Plastizität und geringe Verwitterungsbeständigkeit auszeichnen (SIMET & THOM, 1990, S.6f. und 15). Diese Gesteine geben gemeinsam mit der Raibl Formation (es können vereinzelt Rauhwacken gefunden werden) eine denkbar schlechte Basis für die Hauptdolomitplatte des Jochschrofens ab, die am Kleinen Jochschrofen über der B 308 in die Luft ausstreicht (vgl. Abb. 12).



Abb. 12 Kleiner Jochschrofen von der B308 vor Abbaubeginn (blau eine Bankungsebene). Aufnahme des Autors.

Der Kleine Jochschrofen wurde während der pleistozänen Eiszeit vom über das Oberjoch transfluierenden Ostrachgletscher angeschnitten (am Wandfuß befindet sich die Seitenmoräne), und nun – nach dem Rückschmelzen des stützenden Eises - fehlt dem übersteilten Hauptdolomit das Widerlager. An tektonisch entstandenen Klüften (die nun offenen Spalten wurden von einem Höhlenforscher bis in eine Tiefe von 30 m befahren!) rissen einige Dolomittürme ab und bewegten sich langsam entlang des Gleithorizontes der Arosazone talwärts. Das zugrunde liegende Modell "hart auf weich" wurde bereits von POISEL & EPPENSTEINER (1988a, S.1354f., 1988b, S.189-194, 1989, S.16-20) für zahlreiche Massenbewegungen vorgeschlagen.

Die Felsbewegungen wurden, wie routinemäßige Begehungen der kritischen Klüfte zeigten (SCHMID & VON POSCHINGER, 1999), in den letzten Jahren stärker, nicht zuletzt beschleunigt durch starke Regenfälle zu Pfingsten 1999. Wegen der folgenden Bedrohung der B 308 durch abstürzende Blöcke entschloß man sich, die gefährdeten Felspartien zu entfernen.

6.2. Vorgangsweise beim Abbau

Das Straßenbauamt Kempten, welches für die B 308 verantwortlich ist, beauftragte 1999 das Bayrische Geologische Landesamt (SCHMID, VON POSCHINGER) mit den geologischen Untersuchungen und die schweizerische GEOTEST AG (KEUSEN, LINIGER) mit der Planung und Ausschreibung der Abbaumaßnahmen. Aus technischen Gründen wurde die ursprünglich vorgeschlagene Vorgangsweise, drei Sprengungen à 12.000m³ durchzuführen, zugunsten von zahlreichen kleineren Sprengungen zurückgenommen, was kleinere Felsstürze bedeutete. Dies hatte auf das hier dargelegte Felssturz-Projekt sowohl positive als auch negative Auswirkungen (siehe Kapitel 7).

Im März 2000 begannen die schweizerischen Firmen GASSER Felstechnik und BATI-GROUP sowie die lokale Firma WIMMER & WECHS mit den Vorarbeiten für den Abbau – es mußte zunächst ein Schutzgraben und –wall 130m von der Wand entfernt und eine Zufahrt von der B 308 zur Oberkante der Felswand des Kleinen Jochschrofens auf der Seehöhe 1147m hergestellt werden. Von dort aus wurden ab April im Strossenabbau etagenweise nach unten fortschreitend die gefährdeten Partien abgesprengt. Insgesamt wurden 4 Bermen hergestellt (1130 m, 1118 m, 1105 m, 1080 m), die jeweils zunächst als Arbeitsplattform für die nächste Abtragsphase dienten, während sie in Zukunft allfälligen Steinschlag abhalten, die Begehung der Klüfte zu Kontrollzwecken ermöglichen und

Verebnungen für die Begrünung mit Gehölzen darstellen sollten. Die Gesamtkubatur des zu entfernenden Felses sollte zunächst 36.000m^3 betragen (KEUSEN & LINIGER, 1999; vgl. Abb. 13, Abb. 30).



Abb. 13 Abbau in Terrassen, Blick von Osten. Aufnahme des Autors.

Die B 308 selbst, die bloß 50 m vom Schrofen entfernt und etwa 30 Höhenmeter unter dem Wandfuß vorbeiführt, wurde während der gesamten Bauzeit zwischen Hindelang und Oberjoch gesperrt – für Anrainer gab es eine Umleitungsstrecke über die alte Paßstraße. Im Abschnitt unter dem Kleinen Jochschrofen wurde auf die Straße eine 75cm mächtige Deckschicht aus bindigem Material aufgebracht, um sie vor den Felsstürzen zu schützen (vgl. Abb. 14).



Abb. 14 Bedeckte B308 von Westen, links die alte Schutthalde. Aufnahme des Autors.

Je nach Größe und Position der Sprengungen ging ein Teil des Gesteins jeweils sofort als Felssturz ab, ein Teil verblieb auf der Berme und wurde mit Löffelbaggern geräumt. Dies brachte mit sich, daß verschiedene Prozesse beobachtet werden konnten, nämlich erstens "Felssturz" (wenige 100m^3 bis fast 7.000m^3), zweitens "Steinschlag".

Bereits bei der obersten Berme erwies sich der Fels durch seine unterschätzte Zerklüftung als wesentlich aufwendiger zu bohren als geplant – dadurch würde die angepeilte Fertigstellung (Pfingsten) schwerlich realisierbar sein. Wegen des entstehenden Zeitdrucks konnten einige der geplanten Methoden (Kapitel 7) nicht angewandt werden, da sie zu wirtschaftlich nicht vertretbaren Verzögerungen geführt hätten.

Weiters waren manche Spalten wegen der komplizierten und unwegsamen Topographie unzutreffend kartiert, sodaß die Sprengungen immer wieder größere Felsmassen als beabsichtigt lösten. Schließlich wurde fast das Doppelte der prognostizierten Kubatur abgetragen, nämlich etwa 70.000m^3 . Der Schutt lagerte sich am Wandfuß ab und bildete schließlich eine Schutthalde, die weit über die B 308 bis zum Schutzwall bei etwa 1010m (ca. 130m vom Schrofen entfernt) reichte (vgl. Abb. 15).



Abb. 15 Die Sturzhalde vom Schrofen. Das rechte Bild zeigt die überdeckte Straße und den Damm an der nächsten Kehre. Aufnahme des Autors.

Nach Beendigung des Abtrags wurde die gewaltige Schutthalde über der B 308 wieder entfernt und die Straße konnte (mit neuer Fahrbahndecke versehen) im August 2000 wieder dem Verkehr übergeben werden.

6.3. Endzustand nach Fertigstellung

Der größte Teil der gefährdeten Felspartien konnte erfolgreich entfernt werden, wobei die Berme 1130m relativ breit ist, von der Berme 1118m ist stellenweise nur ein schmales Band übriggeblieben, die Berme 1105m (die die Hauptstörung schneidet) ist relativ breit, die Berme 1093m fehlt, die Berme 1080m fehlt im Westbereich (vgl. Abb. 16). In der darunterliegenden Schutthalde (deren Neigung nahe an der Maximalneigung von 38° liegt) wurde eine etwa 3m breite Berme angelegt, um evtl. nachbrechende Blöcke zu bremsen (vgl. Abb. 17). Außerdem wurden Steinschlagnetze angebracht, um die Straße und ihre Benutzer zu schützen. Schließlich wurden Begrünungsmaßnahmen getroffen – freilich dauert die Durchwurzelung noch einige Jahre bis Jahrzehnte.



Abb. 16 Endzustand Kl.Jochschrofen. Aufnahme des Autors.



Abb. 17 Zustand der Halde im August 2000. Aufnahme des Autors.

7. Angewendete Untersuchungsmethoden

Aufgrund der ungewöhnlich langen Schneelage, der geänderten Baumaßnahmen und des unerwarteten Zeitdrucks mußte von einigen Arbeiten wie z.B. Aushebung von Schürfen vor dem Abbaubeginn, Kartierung in der Halde während der Abbauarbeiten, Aufstellen von Meßmarken, Messung der Erschütterung, Auffangen von Streupartikeln an den Flanken der Sturzbahn und Abwerfen von Modellblöcken durch den Bagger Abstand genommen werden. Dennoch konnten in weiten Bereichen aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden – es wäre allerdings für zukünftige ähnliche Untersuchungen (wie sie z.B. in der Schweiz durch WSL (Inst. für Wald, Schnee, Landschaft), Firma GEOBRUGG und Laboratorio di Fisica Terrestre (am ICTS) sowie in Italien durch ISMES und ENEL-CRIS gemacht werden) wünschenswert, solche Arbeiten durchführen zu können.

7.1. Kartierung

Um nähere Angaben über die Verbreitung der vermuteten Unterlage des Kleinen Jochschrofens sowie über die bisherigen Felsstürze zu erhalten, wurde die nähere Umgebung des Wandbereichs kartiert. Als Grundlagen dienten eine strukturgeologische Kartierung des Geologischen Landesamts und das Digitale Höhenmodell DHM 5 vom Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München mit 1-m-Höhenschichtlinien (vgl. Abb. 41), das jedoch im Bereich der Felswand zum Teil nur bedingt brauchbar war (daher wurde später der Versuch unternommen, das DHM aufgrund von weiteren Vermessungsdaten, Kartierungen und Photographien zu verbessern, vgl. Abb. 40, Abb. 42). Besonderes Augenmerk wurde gelegt auf Aufschlüsse der Arosazone und der Raibl Formation, sowie auf Quellaustritte, die evtl. Hinweise auf einen Stauhorizont geben könnten.

Weiters wurde der Felsbereich des Kleinen Jochschrofens selbst untersucht. Besondere Beachtung wurde Abweichungen in der Lithologie und den Klüften und Spalten geschenkt, um die potentielle Größe der Sturzblöcke abschätzen zu können. Einige Teile der Felswand konnten leider wegen der schlechten Zugänglichkeit nicht im Detail kartiert werden. Während der Abtragsarbeiten wurde an den freigelegten Flächen der Fels weiter kartiert.

Schließlich wurde die Schutthalde unter der Wand dokumentiert. Es wurde versucht, die Begrenzung des Schuttsehlers zu finden, einzelne Großblöcke wurden lokalisiert und Unebenheiten sowie die Stümpfe der im Winter gefällten Bäume in der Sturzbahn kartiert, um Anhaltspunkte für die Rauigkeits- und Dämpfungseigenschaften der Böschung zu erhalten.

7.2. Photographie

Begleitend zur Kartierung wurden alle maßgeblichen Merkmale photographisch festgehalten – sowohl vor Beginn der Arbeiten, als auch begleitend während des Abbaus. Dadurch können sowohl der Abbaufortschritt als auch die zugehörigen Sturzhaldenstadien auch im nachhinein gut dokumentiert werden. Die Aufnahmen wurden mit einer Spiegelreflexkamera mit Wechselobjektiven (Normal-, Tele-, Weitwinkel) gemacht. Insgesamt liegen über 500 Photographien vor.

7.3. Aufzeichnung auf Videoband, Vermessung

Sowohl die meisten Felsstürze als auch Wissenswertes aus der Umgebung wurden von LORENZ vom Inst. f. Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur Wien mittels mehrerer Digitaler Videokameras festgehalten. Während der Sprengungen selbst wurden Kameras bei der nahegelegenen Kanzelhütte aufgestellt, von wo aus die Wand und die Halde gut eingesehen werden konnten und wo die Gefährdung durch Trümmerwurf gering war. Auch vom gegenüberliegenden "Ufer" der Sturzhalde wurden Aufnahmen der Felsstürze gemacht. Insgesamt stehen 16 Videosequenzen über 7 Sprengungen zur Verfügung.

Zur späteren geometrischen Auswertung wurden zahlreiche Bäume als Paßmarken eingemessen, wobei als Anhaltspunkte die Vermessungsdaten des Straßenbauamts dienten. Verwendet wurde ein Vermessungsgerät mit Kompaß und Laserdistanzmesser (LEICA Vector), das freundlicherweise vom Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Univ. f. Bodenkultur Wien zur Verfügung gestellt wurde.

Durch die Kenntnis von Kamerastandort, Paßpunkten und Geometrie von Felswand und Sturzhalde können die im Film festgehaltenen Flugbahnen, Blockgrößen und -geschwindigkeiten mit einer Genauigkeit von etwa 20% abgeschätzt werden (vgl. Abb. 40, Abb. 42). Die Geschwindigkeit wurde durch Messen der Entfernung, die in 1s "am Bildschirm zurückgelegt" wurde (24 Einzelbilder entsprechen 1s) ermittelt, wobei der Maßstab am Bildschirm aus den Paßpunkten und der Entfernung des Blocks von der Kamera abgeschätzt wurde.

Erschwerend waren für die exakte Auswertung der Filme die Tatsachen, daß die Sturzhalde in einem schüsselförmigen Geländebereich lag und daher die Blöcke immer von schräg vorne beobachtet wurden (also nicht genau im Profil, was z.B. für Flughöhen- und Aufschlags- bzw. Abflugwinkelmessungen günstig wäre) und daß manche Bereiche der Sturzhalde überhaupt uneinsehbar waren.

Die Staubentwicklung beim Aufprall der Sturzmassen war zwar nicht so massiv wie erwartet, da die Felsstürze aufgrund des verringerten Volumens der Sprengungen kleiner ausfielen. Dennoch brachte sie mit sich, daß der Großteil der Sturzblöcke in der Staubwolke verborgen blieben; nur der Wolke vorausseilende oder aus ihr herauspringende Blöcke konnten für Messungen benutzt werden.

Aufgrund der Staubentwicklung konnte weiters in den seltensten Fällen der gesamte Sturz eines Blockes aufgezeichnet werden, meist sind einzelne Blöcke nur zwei bis drei Sekunden lang sichtbar – also nur drei bis vier Aufschläge lang. Dies ist insbesondere deswegen von Bedeutung, als der Schutt der gesprengten Felspartie über bis zu zehn Sekunden verteilt aus der Wand stürzte, und so der Zeitpunkt des Sturzbeginns eines Blocks meist nicht zuverlässig bestimmt werden kann.

7.4. Simulationsmodelle

7.4.1. Ansatz der "Mittleren Neigung des Sturzhanges" (MNS)

Dieses Modell beruht ausschließlich auf geometrischen Überlegungen. MEISSL (1998) hat damit umfassende Untersuchungen in den Bayrischen Alpen angestellt und eine typische MNS von $29,5^\circ$ für die Bayrischen Kalkalpen festgestellt, wobei Wassergehalt und topographische Randbedingungen diesen Wert zwischen 26° und 33° schwanken lassen können.

Die Anwendung erfolgt am besten mit einem GIS-Programm, wenn ein digitales Höhenmodell zur Verfügung steht. Die Exaktheit des Höhenmodells ist von entscheidender Bedeutung. Zunächst wird eine horizontale Linie zwischen Wand und Halde als Haldenkopf definiert (also an der Stelle, auf der die meisten Blöcke zum ersten Mal steil auftreffen und einen großen Teil ihrer Energie abgeben, siehe Kapitel 5.1 und 5.2). Von dort ausgehend wird eine Fläche aufgespannt, die mit der gewählten MNS abfällt. Der Schnitt dieser Fläche mit dem Gelände gibt die größte Reichweite von Sturzblöcken an. Geschwindigkeiten und Sprunghöhen können allerdings mit dieser Methode nicht ermittelt werden. Außerdem können Hindernisse wie Bermen oder Gräben kaum berücksichtigt werden, wenn diese in der Realität überrollt würden. Der Verfasser erachtete es wenig zweckmäßig, die ermittelte Reichweite im DHM einzuzeichnen, da die Straße, der Graben und der Damm schwer zu bewertende Hindernisse darstellten und beschränkte sich darauf, die tatsächlich erreichten MNS zu ermitteln und mit den von MEISSL (1998) vorgeschlagenen zu vergleichen.

7.4.2. ROFMOD 3 (Fa. Geotest AG, Schweiz)

Dieses zweidimensionale Steinschlagsimulationsprogramm (Windows-Anwendung) wurde von ZINGGELER (1989) begonnen und von der Firma Geotest AG (Schweiz) weiterentwickelt. Es befindet sich noch in der Testphase und ist noch nicht am Markt. Seine Spezialität ist, daß auch die Hinderniswirkung von Bäumen berücksichtigt werden kann, die im Sturzraum stehen. Besonderer Wert wird auf geometrische Gesichtspunkte des Aufpralls (Trichterbildung im Boden, Hebelwirkung, Bodenverdrängung, Einschlag- und Abflugwinkel, Blockrotation) gelegt, wobei allerdings der Block als punktförmig gerechnet wird. Ein Zerbrechen des Blocks kann nicht modelliert werden.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß der Parameter "Rauhigkeit" mit Unsicherheiten behaftet ist, insbesondere was die Anwendung in Schutthalden betrifft (ZINGGELER, 1989, S.111). Folgende Parameter werden eingegeben:

? Blockparameter:

- 3 Blockachsen (daraus wird automatisch die Masse berechnet)
- Startzone

? Böschungparameter:

- Böschungsgometrie als Reihe von Punkten, die durch gerade Strecken verbunden werden.
- Oberflächeneigenschaften in beliebigen homogenen Abschnitten:
 - Dämpfung (dimensionsloser relativer Parameter, Werte zwischen 1 = Fels und 5 = weicher nasser Boden)
 - Rauhigkeit (dimensionsloser relativer Parameter, Werte zwischen 1 = glatt und 16 = sehr rau – die Werte werden aus einer Tabelle mit den Parametern "Größe der Hindernisse" und "Dichte von Hindernissen" ermittelt)
 - Waldbestand (dimensionsloser relativer Parameter, Werte zwischen 1 = kein Wald und 16 = Baumholz 3, dicht). Mangels Waldbestand wurde am Kleinen Jochschrofen stets 1 gewählt.
- Auflösung für Berechnung und Darstellung in Metern.

Nach Eingabe aller Parameter wird ein Simulationsdurchlauf mit einer beliebigen Zahl von Testblöcken durchgeführt. Die Sturzbahnen werden im Profil eingezeichnet. Graphisch werden folgende Ergebnisse dargestellt (und zwar mit drei Verteilungsangaben: Werte, die von 0%, 20%, 50% der Blöcke überschritten werden):

- ? Sprunghöhen
- ? Geschwindigkeiten
- ? Energien (wahlweise kinetisch oder gesamt)
- ? Durchgänge

Für die Böschungsgeometrie wurden die Höhen aus dem DHM der TU München (siehe Kapitel 7.1) entnommen, deren Genauigkeit sich jedoch leider in Grenzen hält, besonders im Wand- und Hangkopfbereich. Zur Kontrolle wurden Winkelmessungen auf Photos (die Bäume am Haldenrand wurden als lotrecht angenommen) herangezogen.

Dämpfung und Rauigkeit wurden über weite Bereiche variiert.

7.4.3. CRSP3 (Colorado Dept. of Transportation, USA)

Dieses zweidimensionale Steinschlagsimulationsprogramm wurde von PFEIFFER, HIGGINS und BOWEN (1989-1990) für MS-DOS und mittlerweile Windows entwickelt und erfreut sich in den USA großer Verbreitung. Die Blöcke werden als punktförmig gerechnet (lumped-mass method), wobei ein Zerbrechen nicht modelliert werden kann. Es erlaubt die Eingabe folgender Parameter (wahlweise in metrischen oder englisch-amerikanischen Einheiten):

- ? Blockparameter:
 - Blockgeometrie (Form, Abmessungen)
 - Dichte
 - Startort
 - Startgeschwindigkeit

? Böschungsparameter:

- Böschungsgeometrie als Reihe von Punkten, die durch gerade Strecken verbunden werden. Die Strecken werden als homogene Abschnitte der Sturzbahn betrachtet, denen die weiteren Parameter jeweils zugeordnet sind. Dabei erzeugt leider die Eingabe von Höhen > 999 sinnlose Ergebnisse.
- Böschungsrauigkeit (als Höhe, sie geht relativ zur Blockgröße in die Modellierung ein, indem jeweils zufällig verteilte Winkelabweichungen der Aufprallpunkte gewählt werden, siehe Definitionen Kapitel 5.1)
- Restitutionskoeffizient (siehe Definitionen Kapitel 5.1)

Nach Eingabe der Böschungsparameter wird ein Durchlauf gestartet, wobei für jeden Durchlauf die Blockparameter und die Anzahl der zu simulierenden Blöcke gewählt werden können. Die Flugbahnen der Blöcke werden graphisch dargestellt. Anschließend können zunächst für einen zuvor definierten Analysepunkt, der sich an einem beliebigen Ort in der Sturzbahn befindet, folgende Ergebnisse betrachtet werden:

? Anzahl der Blöcke, die den Analysepunkt überhaupt passiert haben

? Blockgeschwindigkeiten

? Sprunghöhen

? Kinetische Energien (werden irrtümlich in J statt kJ angegeben, die Werte sind daher um den Faktor 1000 zu hoch!)

Dabei werden Maximalwerte, Durchschnittswerte (arithmetisch und geometrisch), Standardabweichung und Angaben zur Verteilung angezeigt (Werte, die von 50%, 75%, 90%, 95% und 99% der Fälle nicht überschritten werden). Anschließend werden diese Daten auch durch Blockdiagramme dargestellt.

Die Sprunghöhenergebnisse sind nach Meinung des Verfassers teilweise inkonsistent. Häufig ist nämlich die Standardabweichung größer als der Maximalwert und auch die Verteilungsdaten sind oft viel zu hoch. Es dürfte sich hier um einen Programmierfehler handeln. Maximalwert und Durchschnittswert werden vom Verfasser als brauchbar eingeschätzt, der Rest als unbrauchbar.

Weiters werden die am Ende jedes Abschnitts auftretenden Geschwindigkeiten und Sprunghöhen angezeigt (Maximalwerte und Durchschnittswerte) und graphisch

dargestellt (Blockdiagramm, Abschnitte à 10m).Schließlich wird angegeben, in welchen Abschnitten wie viele Blöcke zum Stillstand gekommen sind.

Für die Böschungsgeometrie wurden die Höhen aus dem DHM der TU München (siehe Kapitel 7.1) entnommen, deren Genauigkeit sich jedoch leider in Grenzen hält, besonders im Wand- und Hangkopfbereich. Zur Kontrolle wurden Winkelmessungen auf Photos (die Bäume am Haldenrand wurden als lotrecht angenommen) herangezogen (wie bei ROFMOD 3).

Die Restitutionskoeffizienten (normal und tangential) wurden aus einer Anleitung des Programmes "Rocfall3" (siehe Kapitel 5.3) entnommen, die Angaben von PFEIFFER (1989-90), EVANS & HUNGR (1988) und ROBOTHAM (1995) entstammen. Die meisten Werte befinden sich in folgenden Bereichen:

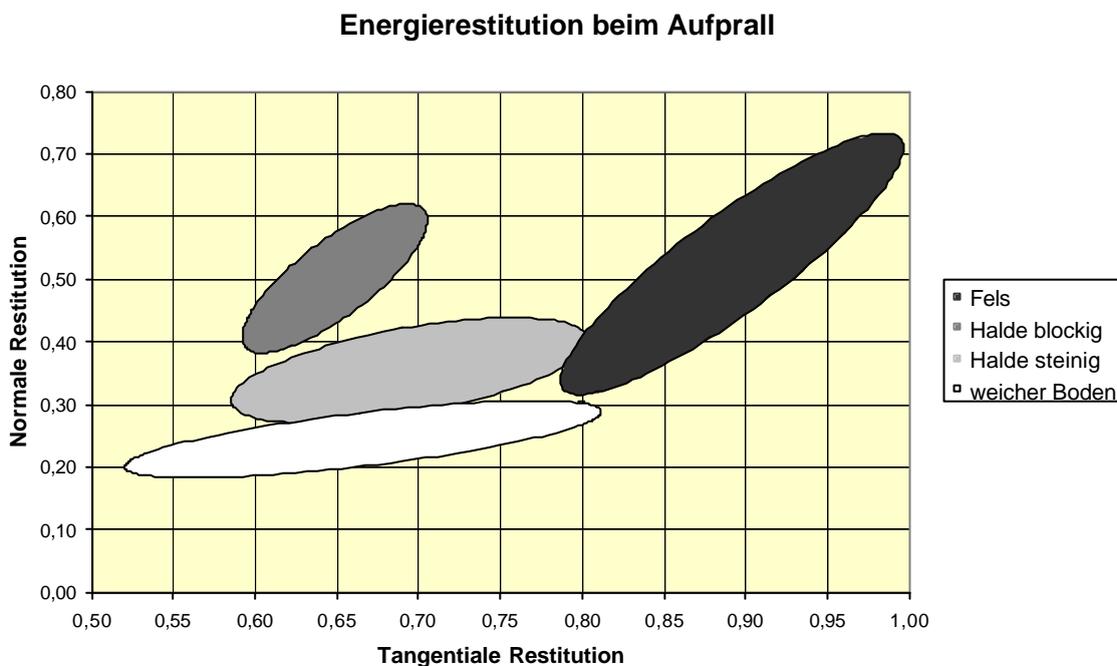


Abb. 18 Energierestitution beim Aufprall nach PFEIFFER (1989-90), EVANS & HUNGR (1988) und ROBOTHAM (1995). Graphik des Autors.

Die Böschungsrauigkeit wurde gemäß der Blockgrößensortierung zwischen 0,1m und 4m, mit Schwergewicht auf 0,5m variiert (siehe Abb. 37f.).

Als Blockdichte wurde $2,7\text{kg/m}^3$ angenommen, die Blockgeometrie wurde variiert. Als Horizontalkomponente der Startgeschwindigkeit wurden Werte von 1m/s bis 10m/s, als Vertikalkomponente meist -1m/s gewählt (positiv nach oben).

7.4.4. Vergleich der Simulationsmodelle

Kriterium	MNS	ROFMOD 3	CRSP 3
Anwendbarkeit auf größere Fläche	Sinnvoll (GIS), Eingrenzung von Problembereichen	Sehr aufwendig, aber dann recht genau	Sehr aufwendig, aber dann recht genau
Berücksichtigung der Geländeform	Hangneigung nur pauschal, ungenau (schleifende Schnitte!), aber dreidimensional	Beliebig genau, aber zweidimensional (Kriterium: Geschwindigkeit)	Beliebig genau, aber zweidimensional (Kriterium: Geschwindigkeit)
Berücksichtigung der Böschungseigenschaften	Nur pauschal über den ganzen Hang möglich, Erfahrungswerte verbreitet, aber schwierig zu wählen	Beliebig genau wählbar, keine physikalische Grundlage, Erfahrungswerte nur von Fa.GEOTEST, für weiche Böden mit Baumbestand, wenig Erfahrung mit Grobschutt	So genau wählbar wie Geometrie, physikalisch begründet, Erfahrungswerte für harte Böden verbreitet, aber schwierig zu wählen, ohne Baumbestand, wenig Erfahrung mit Grobschutt
Berücksichtigung der Blockeigenschaften	Keine	Drei Seitenlängen beliebig (ohne Rundung), Dichte fix, Startgeschw. beliebig	3 Typen von Geometrien, Größe, Dichte und Startgeschw. frei wählbar, Größe fließt zutreffend in Rauigkeit und Masse in Dämpfung ein
ausgegebene Resultate	nur Reichweite	Reichweite, Geschwindigkeiten, Sprunghöhen, Blockenergien an beliebigen Orten	Reichweite (Schätzwert), Geschwindigkeiten, Sprunghöhen, Blockenergien an beliebigen Orten

8. Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten

8.1. Kartierung

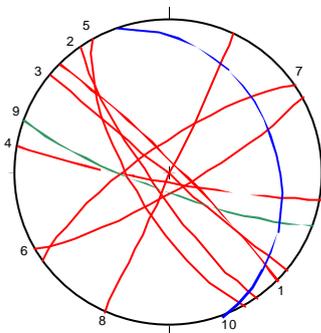
8.1.1. Geologie und Geomorphologie des Arbeitsgebiets

Der Kleine Jochschrofen war eine stark aufgelöste Felswand am unteren Ende der Steilstufe, die vom Jochschrofengipfel (als Schichtkopf) nach S zieht. Der Ostteil war nach SSE, der Westteil nach SSW exponiert und wies dazwischen eine entsprechende konvexe Wölbung auf. Der Wandfuß liegt im W bei etwa 1060m (nach E zu bis nach 1080m hinaufziehend), während die Oberkante des steilen Bereichs bei etwa 1140m lag. Die Oberkante des senkrechten Teils des Hauptturms lag auf etwa 1105m, es folgten jedoch, durch kleine Verebnungen getrennt, weitere kleinere Wandbereiche. Im E-Teil existierte eine Rinne mit einem darüberliegenden konkaven Wandteil. Die Einzeltürme hatten sich seit der Eiszeit bis zu 2m talwärts bewegt und mehrere m abgesenkt. Daher waren die Türme von bis zu 2m breiten Spalten von einander getrennt, die jedoch nach unten hin mit Blockwerk gefüllt waren. Hinter dem Hauptturm befand sich die in Kapitel 6.1 erwähnte senkrechte Höhle, die bis auf Höhe des Wandfußes gereicht haben dürfte. Das bedeutet, daß der Hauptturm beinahe frei stand und sich nur an die Spaltenfüllung anlehnte (vgl. Abb. 19).



Abb. 19 Der Hauptturm von der Kanzel aus (li), die Hauptkluft hinter dem „Bankerlturm“ (re, während des Abbaus). Aufnahme des Autors.

Die Schichtflächen des Hauptdolomits am Kleinen Jochschrofen fallen entgegen dem allgemeinen Trend des Jochschrofens nach ENE bis ESE ein (anstatt nach SE). Die liegenden Bereiche der Wand (1060m bis 1100m) sind wenig geschichtet, weisen nur eine undeutliche Bankung auf und zeigen kaum die ansonsten im Hauptdolomit häufige Kleinbrecciiierung (SCHMID & VON POSCHINGER, 1999, S.2f.). Daher sind diese Bereiche sehr massig – der Hauptturm schien überhaupt aus einer einzigen riesigen Säule von 35 m Höhe und 10 m Durchmesser bestanden zu haben. Die seltenen Klüfte stehen überwiegend senkrecht und lassen sich keinem allgemeinen Trend zuordnen (vgl. Abb. 20). Sie sind oft weit geöffnet, und an ihnen haben die erwähnten starken Bewegungen stattgefunden.



Rot: Klufflächen, z.T. weit geöffnete Spalten

Blau (10): Bankungsflächen (selten, ohne Bewegung)

Grün (9): Böschung (Wand)

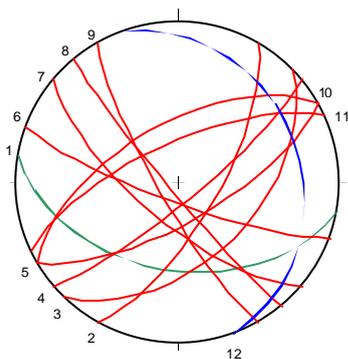
Gefährlich: kf 1 bis 6

(Hauptkluft: 1 bzw. 4 im Osten)

Ungefährlich: kf 6 bis 8

Abb. 20 Kluffrose Kleiner Jochschrofen, 1060 bis 1100m.

Abseits der massigen Dolomitpartien, also hauptsächlich über 1100m, sind die Hauptkluftrichtungen 120-150 / 50-90, also mittelsteil bis steil schräg hangauswärts, und 200-240 / 70-90, also steil schräg hangauswärts bis wandparallel (Gefügewerte nach CLAR, vgl. Abb. 21). Beide sind für die Wandstabilität ungünstig. Weiters gibt es eine untergeordnete Kluftchar mit 330 / 50-80, also steil hangeinwärts und damit ungefährlich. Die Kluftkörper haben Volumina zwischen wenigen dm^3 und etwa 1m^3 .



Rot: Klufflächen

Blau (12): Schichtflächen

Grün (1): Böschung

Gefährlich: kf 2 bis 9

Ungefährlich: kf 10 bis 11

Die sf spielen keine Rolle.

Abb. 21 Kluffrose Kl. Jochschrofen auf 1140m.

In den hangenden Anteilen (1100m bis 1140m) tauchen immer wieder dunkle scharfkantig brechende Kalke auf, die eine deutliche Feinschichtung im mm-Bereich zeigen (vgl. Abb. 22). Immer wieder treten in diesen Bereichen Diskordanzen auf (Winkeldifferenz bis 30°), die auf wechselnde Sedimentationsverhältnisse in der vermutlich durch Priele durchzogenen Dolomitplattform zurückzuführen sind, in der immer wieder kleinräumige Bereiche abgetragen wurden und Priele erneut verfüllt wurden. Jedenfalls wurden diese evtl. stratigraphisch interessanten Aufschlüsse wegen der geringen Bedeutung für das Steinschlagprojekt nicht weiter verfolgt.



Abb. 22 Dunkler Kalk, von Hauptdolomit diskordant überlagert. Aufnahme des Autors.

Von der im Liegenden vermuteten Raibl Formation konnten nirgends Aufschlüsse angetroffen werden, allerdings wurden im Schuttstrom, der von Norden parallel zur Jochschrofen-Westwand herunterzieht, immer wieder Rauhacken gefunden, die aber von hangaufwärts stammen dürften. Dennoch scheint die Vermutung, daß unter dem Kleinen Jochschrofen Raibl Formation ansteht, recht plausibel, auch insofern, als es am Hangfuß ein Schwefelheilbad gibt, das sein Wasser aus der bekanntermaßen gipsführenden Raibl Formation bezieht (SCHOLZ, 1995, S.30).

Im genannten Schuttstrom westlich des Schrofens konnten nirgends Aufschlüsse nachgewiesen werden. Die Komponenten bestehen hauptsächlich aus Hauptdolomit, vereinzelt wie gesagt Rauhwanke, ebenso vereinzelt Kissenlaven und Couches Rouges aus der liegenden Arosazone. Aufschlüsse aus der Arosazone finden sich am Westrand des Schuttstroms an der Abrißkante zum Hirschbachtobel sowie südlich der Kanzelhütte am Wildbachtobel (bei der Kehre der B 308 auf der Höhe 900 m), wo Kissenlaven und vermutlich eingeschuppte oberostalpine Losensteinformation zu finden sind. Unter Annahme einer gleichmäßig geneigten Überschiebungsbahn erscheint es plausibel, daß die Arosazone nur knapp unter dem Wandfuß des Kleinen Jochschrofens ansteht – nachgewiesen konnte sie dort aber nicht werden (Abb. 29).

Der Hang zwischen dem Schrofen und den Wildbachtobel wird durchgehend von der Seitenmoräne des Ostrachgletschers bedeckt, sodaß die darunter vermutete Arosazone an der Oberfläche nicht sichtbar ist.

8.1.2. Kartierung der Schutthalde

Unmittelbar unter dem Schrofen war ein Schuttschleier von wenigen Metern Mächtigkeit anzutreffen, der sich nach unten zu rasch verlor. Am Fuße der Kanzel (auf der die Kanzelhütte steht), unmittelbar neben der Straße, liegt ein gewaltiger Sturzblock von geschätzten 3.000t Masse, der vor mindestens 100 Jahren (aus dem Bewuchs zu schließen) aus dem Ostbereich der Wand gebrochen sein dürfte, sowie etwas oberhalb NW davon einer von knapp 1.000t. Unter der B 308 (Höhe 1030m) ging der Schuttschleier auf weniger als 1m Mächtigkeit zurück, allerdings liegen weiter unten (bis minimal 990m Höhe, maximal 200m vom Schrofen entfernt) drei alte Sturzblöcke von bis zu 1.000t (vgl. Abb. 23).



Abb. 23 Die Halde zu Beginn der Arbeiten. Rechts ist ein Block von etwa 1000t Masse zu sehen. Aufnahme des Autors.

8.1.3. Quellkartierung

Im Schuttstrom am Westrand des Jochschrofens konnten vier Quellen lokalisiert werden, die aus dem Schutt, z.T. auch von unterhalb größerer Blöcke, heraustreten. Es konnte jedoch kein Zusammenhang mit einem wasserstauenden Horizont, wie er durch die Arosazone gebildet werden könnte, nachgewiesen werden. Vielmehr dürfte es sich um aus der mächtigen Schuttdecke überlaufendes Hangwasser handeln. Der Schuttstrom weist nämlich eine z.T. stark bindige Matrix auf.

Weiters wurde bei der Herstellung des Schutzgrabens und –walls unter der B308 (der sich auf etwa 1010m befindet) eine Vernässung angefahren. Sie lag etwa 50cm unter der Geländeoberkante (i.d.F. GOK genannt) – genau an der Grenze zwischen der Seitenmoräne und dem aufliegenden Hangschutt. Es dürfte sich demnach um Oberflächenwasser handeln, das an der Oberkante der Moräne entlangsickert und auf dem Wanderweg am Ende der Schutthalde, unterhalb des Schutzdamms, schließlich die GOK erreicht. Im Graben vor dem Schuttdamm war ein 2m tiefes Profil zu sehen, wo etwa 50cm Hangschutt der Moräne aufliegt. Die obersten 50cm der Moräne wiesen eine Limonitfärbung auf und dürften im Jahresschnitt über dem Hangwasserspiegel gelegen haben, während die tieferen Partien durch Reduktion hellgrau gefärbt waren. Im Graben sammelte sich schließlich 2m unter der GOK das Hangwasser an, wobei der auf die Oberkante der Graufärbung fehlende Meter vermutlich nur auf den geringen Wasserandrang zurückzuführen war (vgl. Abb. 24).



Abb. 24 Schutzgraben und –wall von Westen aus. Aufnahme des Autors.

8.2. Visuelle Beurteilung der Felsstürze (Photos, Video)

Zu Beginn der Abbauarbeiten (hauptsächlich Kleinsprengungen und Beräumung mit Baggern auf den Bermen 1145m und 1130m) im April 2000 war die Reichweite der Blöcke noch sehr gering, da erstens die Sturzbahn noch von humosem Oberboden, der eine hohe Dämpfung aufweist, bedeckt und von Baumstrünken durchsetzt war, und zweitens die Neigung der Sturzbahn noch flacher war als der Schüttwinkel. Daher wuchs die frische Schutthalde langsam vom Hangkopf talwärts, wobei die oberen Anteile von feinerem Material ($< 1\text{cm}$) gebildet wurden, die unteren von Grobmaterial ($< 50\text{cm}$). Als Böschungswinkel stellte sich unabhängig von der Korngröße etwa 37° (75%) ein (vgl. Abb. 25).



Abb. 25 Schrofen und Halde im Profil von W (Kellerwand). Aufnahme des Autors.

Bei fortschreitendem Abbau (Berme 1130m) erreichte die Schutthalde Ende April die überdeckte B308, wobei der Böschungswinkel dort nur mehr 35° (70%) betrug. Die erste größere Sprengung am 26.4. (Kopf des Hauptturms auf Höhe 1110m) lieferte Blockgrößen bis 100cm, die mehrfach auch knapp unterhalb der Straße zu liegen kamen. Dabei stellte jedoch die Straße, die doch eine etwa 8m breite Verebnung bildete, ein bedeutendes Hindernis dar, auch weil das bindige Deckmaterial eine höhere Dämpfung

besaß und die dort liegende Einzelblöcke zu weiteren Hindernissen wurden. Die charakteristischen Blockgeschwindigkeiten bewegten sich oberhalb der Straße recht konstant bei 13 – 15m/s, während die Bremsung auf der Straße plötzlich erfolgte (innerhalb max. 1s).

Anfang Mai (Berme 1118m) erreichten die ersten Blöcke (bis 200cm) den etwa 4m breiten Schutzwall, einer durchschlug sogar seinen Kamm, blieb aber wenige m dahinter liegen. Die Böschungsneigung verringerte sich auf etwa 35° (70%). Oberhalb der Straße (mit Ausnahme des Westteils) betragen die maximalen Blockgrößen 50cm, große Blöcke erst weiter unten bzw. im Westteil der Böschung auch oberhalb der Straße. Erstmals fiel auf, daß die durchschnittliche Reichweite der Felsstürze aus großen Sprengungen geringer war als beim Beräumen mit dem Bagger. Die Hauptmasse des Sturzmaterials blieb bei der Straße liegen – einzelne Blöcke erreichten freilich dennoch den Schutzwall. Gemessene Blockgeschwindigkeiten bewegten sich bei 15m/s (gut 50km/h), die Sprunghöhe größerer Blöcke (1-2m³) betrug etwa 1m, die Sprungweite bis zu 15m (das entspricht Energien von 0,5 bis 1MJ). Der Energieverlust beim ersten Aufprall im weichen Hangkopf betrug 50% bis 80%, in manchen Fällen bis 100%. In zwei Fällen betrug die Sprunghöhe von 1m³ großen Blöcken (gut 2t) knapp 4m bei einer Geschwindigkeit von etwa 20m/s (ca. 70km/h). Die maximalen Sprungweiten erreichten 30 bis 40m. Ein Block (geschätzte 200kg) wurde beobachtet, wie er mit etwa 35m/s (fast 130km/h) in gestrecktem Lauf die Schutthalde hinunterraste (Energie etwa 100kJ), was dadurch erklärt werden könnte, daß er aus freiem Fall auf einem stark geneigten Felsteil nahe des Wandfußes (also nicht in der weicheren Schutthalde) aufgeschlagen haben und mit geringem Energieverlust weggeschleudert worden sein könnte.

Gegen Ende Mai (Berme 1118m fertig) war im zentralen Teil die Straße völlig zugedeckt und daher die anfangs von ihr gebildete Stufe nicht mehr vorhanden, was die Reichweite entscheidend vergrößerte. Ein ziemlich isometrischer Block von etwa 20t rollte am Ostende des Schutzwalls vorbei und blieb erst 225m vom Wandfuß entfernt (auf Höhe 978m, also über 110m tiefer als der Ursprungsort) liegen. Er dürfte aus der Wand nach Osten in die Rinne ausgebrochen sein und dadurch ohne Aufschlag den Großteil seiner Energie mitgenommen haben. Seine Mittlere Fahrböschung (er beschrieb eine Kurve) betrug etwa 50% oder 26°, die entsprechende MNS etwa 45% oder 24° - beides sehr niedrige Werte, die der Block vermutlich seiner geometrisch günstigen Form zu verdanken hat. Soweit man aufgrund der häufigen Richtungsänderungen seiner Bahn schließen kann, dürfte die Geschwindigkeit allerdings sehr gering, jedenfalls < 5m/s

(15km/h) gewesen sein, er konnte dennoch nicht früher anhalten, da keine seiner Seitenflächen groß genug war, um durch Hebelwirkung seine Rotation zu stoppen (vgl. Abb. 26).



Abb. 26 Einzelblock von etwa 20t, der bis zur Höhe 978m gerollt ist. Daneben der Autor. Aufnahme von T.Kuhn.

Anfang Juni (Berme 1105m) wiesen die Blöcke im Schutzgraben vor dem Wall maximale Durchmesser von 300cm auf. Die Mächtigkeit der Schutthalde unter dem Wandfuß betrug etwa 2 bis 3m. Die Korngröße bis über die Höhe der Straße betrug beim Beräumen nur 10cm, bei der großen Sprengung am 24.6. (Berme 1080m, etwa 7.000m³) blieb die Hauptmasse der Blöcke (bis 200cm) wiederum auf Höhe der Straße liegen. Ein eher isometrischer Block von etwa 200t erreichte jedoch im Westen mit etwa 10m/s rollend den Graben (Energie gut 10MJ) er "walzte", wie in Kapitel 5.2 postuliert, alle Unebenheiten nieder und sprang nicht. Vgl. Abb. 27).



Abb. 27 Am 24.Juni rollte ein Block von etwa 200t bis in den Graben. Aufnahme des Autors.

Im Juli waren die Felsarbeiten abgeschlossen, die Mächtigkeit der Halde am Wandfuß betrug ca. 5m. Diese Halde wurde nun (bis Anfang August) nach unten befördert, bis sie nahtlos mit einer Neigung von 35° in die Rückseite des Schutzwalls überging.



**Abb. 28 Die von der Straße abwärts beförderte Schutthalde im August.
Aufnahme des Autors.**

8.3. Resultate nach der "Mittleren Neigung des Sturzhanges"

Wie in Kapitel 7.4.1 erwähnt, wurden ausschließlich die im Gelände aufgetretenen MNS ermittelt. Die Ergebnisse sind aus Abb. 32 bis Abb. 34 ersichtlich. Zu Beginn der Abbauarbeiten im April war die MNS größer (etwa 37°), was vermutlich auf die Dämpfung der noch grasbedeckten Böschung zurückgeführt werden kann. Sobald die Böschung jedoch ab Mai gänzlich von – sortiertem – Schutt bedeckt und die Straße verschüttet war, sanken die MNS bald auf 31° und schließlich 30° (im Juni) ab, wobei die ungenaue Kenntnis der anwachsenden Halde am Wandfuß diese Werte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Auffällig ist jedoch, daß die gefundenen Werte gut mit dem von MEISSL (1998, S.145f.) vorgeschlagenen ($29,5^\circ$) übereinstimmen.

Unter der Annahme, kein Damm hätte die Felsstürze zurückgehalten, wäre die Reichweite noch um einige Meter bis Zehnermeter größer gewesen, während der Höhenunterschied wegen der geringen Hangneigung in diesem Bereich nur wenig größer geworden wäre. Daher wären auch Werte von deutlich unter 30° möglich gewesen, was auch der „Ausreißer“, der Ende Mai 2000 weit am Damm vorbeierollte und eine MNS von 24° aufwies, bestätigt (vgl. Kapitel 8.2 und Abb. 26).

8.4. Resultate nach ROFMOD 3

Die Simulation der Blockgeschwindigkeiten im oberen Sturzhaldenbereich stimmt im wesentlichen mit den am Kleinen Jochschrofen gemessenen Geschwindigkeiten überein (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Simulierte und beobachtete Geschwindigkeit in Höhe der B308.

	ROFMOD 3	Beobachtet
$v_{\min.}$ (m/s)	8	0
$v_{\text{durchschn.}}$ (m/s)	10	15
$v_{\max.}$ (m/s)	30	35

Die Simulation der Gesamtreichweite von Blöcken ergibt für die angenommenen Sturzbahnparameter (Dämpfung, Rauigkeit) meist deutlich zu große Werte – sieht man von dem einen Ausreißer von Ende Mai 2000 ab, der 200m erreichte. Ein Grund dafür könnte darin liegen, daß in der Halde verteilte größere Blöcke nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Vor allem das Phänomen, daß Blöcke mit hoher Geschwindigkeit auf noch größere treffen und unmittelbar zum Stillstand gezwungen werden, kommt offensichtlich in der Simulation zu kurz (AZZONI, 1991, S.310). Dieses Phänomen ist allerdings aufgrund der Zufälligkeit der Blockverteilung sehr schwer in ein Modell zu fassen. Weiters dürfte der Aufprall an kleinere Blöcke und die damit verbundene Impulsübertragung eine zusätzliche Dämpfung bewirken. Schließlich ist der von ZINGGELER (1989, S.49) gewählte Rollreibungswinkel von 45% vermutlich zu gering gewählt – MEISSL (1998, S.145f.) schlug für Schutthalden in den Kalkalpen 57% vor. Demgegenüber liegen die berechneten Sprunghöhen durchwegs zu niedrig (um den Faktor 4 und mehr).

Jedenfalls konnten annähernd zutreffende Ergebnisse, was die Reichweite der Blockstürze betrifft, nur durch Annahme von offensichtlich unzutreffenden Böschungsparametern (weicher, nasser Boden, maximale Rauigkeit) erzielt werden (vgl. Tabelle 2, Abb. 35, Abb. 36).

Tabelle 2: Nach ROFMOD3 simulierte (zutreffende bzw. manipulierte Parameter) und beobachtete Reichweiten und Sprunghöhen

	ROFMOD 3	ROFMOD 3 manip.	Beobachtet
Reichweite max. (m)	150	150	200
Reichweite durchschn. (m)	150	140	80
Reichweite min. (m)	150	120	20
Sprunghöhe max. (m)	1,5	0,4	4
Sprunghöhe durchschn. (m)	1	0,2	1
Sprunghöhe min. (m)	0	0	0

Die Varianz der Ergebnisse aus ROFMOD3 ist wesentlich geringer, als sie aus den Video- und Photoaufnahmen zu schließen ist. Nur im Auslaufbereich sind geringe Unterschiede in Geschwindigkeiten (und damit Energien), Sprunghöhen und Reichweiten festzustellen.

Bestätigt werden konnte die im Modell getroffene Annahme, daß nicht isometrische Blöcke (säulige oder plattige Blöcke) sich beim Springen und Rollen in eine solche Lage drehen, daß ihr Rotationsträgheitsmoment maximal wird (also Rotation um die kleinste Achse). Allerdings kann das Verfahren, wie die Blockgeometrie in das Modell einfließt, nicht ganz nachvollzogen werden, da das Programm nämlich bei Vertauschen der x-Abmessung (in Sturzrichtung) und der z-Abmessung (lotrecht) unterschiedliche Ergebnisse bringt, was dem Verfasser nicht plausibel erscheint, da diese Achsen ja um die y-Achse rotieren.

8.5. Resultate nach CRSP3

Grundsätzlich kann gesagt werden, daß die Resultate nach CRSP3 recht gut mit den wirklich angetroffenen Verhältnissen übereinstimmen. Gewählt wurden Rauigkeiten zwischen 0,1m und 3m (je nach Verhältnissen in der Böschung laut Photographien) sowie Restitutionskoeffizienten (normal / tangential) von 0,5 / 0,9 für Fels und 0,4 / 0,7 für die Schutthalde. In den feinkörnigen Bereichen am Haldenkopf wurde R_n auf 0,3 und R_t auf 0,5 vermindert, um die große Verformbarkeit mit Bildung eines Walls vor dem Block zu berücksichtigen (siehe im Anhang Abb. 37 ff.).

Das Phänomen, daß der Reibungswinkel abhängig vom Verhältnis Sturzblockdurchmesser zu Durchmesser der Blöcke in der Sturzbahn ist, wird offensichtlich angemessen berücksichtigt – die Reichweiten größerer Blöcke sind tatsächlich größer als die kleinerer. Weiters springen größere Blöcke in der Halde nicht so hoch, so wie es in Kapitel 5.2 postuliert und auch tatsächlich beobachtet werden konnte (Kapitel 8.2), vgl. dazu im Anhang die Abb. 38 und

Abb. 39.

Außerdem wurde der Effekt bestätigt, daß Blöcke, die noch in den steilen Felsbereichen auftreffen, ohne nennenswerten Energieverlust große Beschleunigung in Horizontalrichtung erfahren, also weit aus der Wand hinausgeschleudert werden. Wie in Kapitel 8.2 erwähnt, konnte ja einmal ein Block mit 35m/s (knapp 130km/h) beobachtet werden.

Die Reichweiten reagieren ziemlich empfindlich auf Änderungen in der Böschungsneigung. Das bedeutet, daß die Grundlagen für die Annahme des Böschungsprofils (in diesem Falle das DHM) große Genauigkeit aufweisen müssen, um zutreffende Werte für die Reichweiten zu erhalten. Dies war jedoch leider nicht der Fall (siehe Kapitel 7.1) – daher muß hier mit einer gewissen Unsicherheit gerechnet werden.

Außerdem reagieren die Reichweiten empfindlich auf die gewählte Rauigkeit. Beachte, daß kleinere Blöcke im Endstadium des Abbaus (mit sehr großen Blöcken vor dem Damm) genau dort abrupt stehenbleiben.

Allerdings sind die simulierten Sprunghöhen für große Blöcke größer als die im Video festgehaltenen (vgl. Tabelle 3 und

Tabelle 4). Das wird darauf zurückgeführt, daß die plastischen Verformungen im Lockergestein umso größer sind, je größer die Masse des Sturzblockes ist, was zwar berücksichtigt wird, aber offensichtlich nicht angemessen.

Schließlich konnte die Anfang Mai '00 und 24.6.00. gemachte Beobachtung, daß größere gleichzeitig abgehende Felsmassen (wenige 1000m³) eine geringere durchschnittliche Reichweite haben, mit CRSP3 nicht nachvollzogen werden (vgl.

Tabelle 4). Möglicherweise stören sich die Blöcke beim gemeinsamen Aufprall mehr als sie sich gegenseitig weiterstoßen.

Tabelle 3: Nach CRSP3 simulierte und beobachtete Reichweiten von Blöcken unterschiedlichen Durchmessers, sowie Sprunghöhen und Geschwindigkeiten in der Halde, für die Sprengung vom 26.4.00. Gewählte Rauigkeit um 0,5m.

	CRSP3	Beobachtet
Reichweite groß max. (m)	120	100
Reichweite groß durchschn. (m)	115	90
Reichweite groß min. (m)	90	80
Reichweite klein max. (m)	120	90
Reichweite klein durchschn. (m)	90	70
Reichweite klein min. (m)	25	25
Sprunghöhe max. (m)	3	2
Sprunghöhe durchschn. (m)	1	1
Sprunghöhe min. (m)	0	0
Geschw. max. (m/s)	30	28
Geschw. Durchschn. (m/s)	15	15
Geschw. min. (m/s)	0	0

Tabelle 4: Nach CRSP3 simulierte und beobachtete Reichweiten von Blöcken unterschiedlichen Durchmessers, sowie Sprunghöhen und Geschwindigkeiten in der Halde, für die Sprengung vom 24.6.00. Gewählte Rauigkeit von 0,1m im Haldenkopf bis 3m im Haldenfuß.

	CRSP3	Beobachtet
Reichweite groß max. (m)	150	100
Reichweite groß durchschn. (m)	130	80
Reichweite groß min. (m)	120	60
Reichweite klein max. (m)	120	100
Reichweite klein durchschn. (m)	110	50
Reichweite klein min. (m)	10	10
Sprunghöhe max. (m)	4	2
Sprunghöhe durchschn. (m)	1	1
Sprunghöhe min. (m)	0	0

Geschw. max. (m/s)	21	25
Geschw. Durchschn. (m/s)	13	15
Geschw. min. (m/s)	0	0

9. Diskussion der Ergebnisse

Ein Vergleich der aufgeführten Simulationsmodelle (MNS, ROFMOD3, CRSP3) zeigt, daß trotz sehr unterschiedlicher Modellansätze durchaus vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Vor allem die Werte "Blockgeschwindigkeit" und "Blockenergie" werden von den dynamischen Modellen durchwegs gut angenähert, was besonders für die Bemessung von Steinschlagnetzen oder –galerien (die ja die Energien absorbieren müssen) wichtig ist. Die Reichweite ist weniger verlässlich, wobei im CRSP dafür auch gar keine Kalibrierung durchgeführt worden ist.

Entscheidend ist jedoch, daß die Annahme der zutreffenden Böschungsparameter bei allen Modellen in Hinblick auf die Sprunghöhen und Reichweiten das größte Problem darstellt:

- ? Ein geringer Fehler in der Annahme der MNS wirkt sich für die Reichweite insbesondere dann stark aus, wenn die tatsächliche Böschungsneigung ohnehin etwa diesen Winkel aufweist, was in den meisten Fällen zutrifft – viele Sturzhänge sind das Resultat von jahrtausendlang wiederkehrenden Felsstürzen und Steinschlag. Eine möglichst exakte Erfassung der Hanggeometrie ist daher unbedingt notwendig (geometrisch kann man sich das Problem als "schleifenden Schnitt" vorstellen).
- ? Die fehlende Möglichkeit, Hindernisse wie Bermen, Gräben und Dämme in die Methode der MNS einfließen zu lassen, stellt für diese einen entscheidenden Nachteil dar. Ihr Vorteil liegt ausschließlich in der einfachen und schnellen Anwendung, auch auf größere Flächen.
- ? Die Rauigkeit der Böschung (ROFMOD3) muß relativ zum Durchmesser des Sturzblockes gesehen werden und ist daher nicht einfach zu ermitteln.
- ? Ebenso ist die Ermittlung des Restitutionskoeffizienten (CRSP3) problematisch. Es können zwar grobe Richtwerte angegeben werden, diese sind allerdings auch von der Masse des Sturzblockes abhängig.
- ? Der Einfluß der Sortierung in der nackten Sturzhalde ist offensichtlich bisher eher unterbewertet worden. CRSP3 bindet den Effekt des Verhältnisses Durchmesser Sturzblock zu dem der Blöcke in der Böschung einigermaßen zutreffend ein, bei

ROFMOD3 und "MNS" ist dies nicht möglich. Bei Sturzhängen, die von Humus und Vegetation bedeckt sind, geht die Sortierung natürlich nicht in die Reichweite ein.

- ? Offensichtlich ist die Reichweite auch von Felsstürzen geringen Ausmaßes vom Volumen abhängig, und zwar dürfte die Reichweite mit steigendem Volumen zunächst sinken – möglicherweise stören sich die Blöcke gegenseitig nur. Erst beim Erreichen einer kritischen Größe, ab der die gegenseitige Beeinflussung der Blöcke in ein Fließen übergeht, wächst sie wieder an. OKURA et al. (2000) konnten jüngst diese Beobachtung bei Tests mit Granitwürfeln unter kontrollierten Bedingungen bestätigen. Dieser Effekt wird aber für die Simulation vermutlich insofern keine große Bedeutung haben, als erstens die unzutreffende Berechnung auf der sicheren Seite liegt und zweitens einige Blöcke der Masse der Blöcke voraneilen und damit die normale Reichweite aufweisen.

10. Ausblick

Weiterführende Forschungen, wie sie auch weltweit vorangetrieben werden (WSL, Fa.Geobrugg, LFT/ICTS, ISMES, USA, Japan...), sollten vor allem folgende Gesichtspunkte berücksichtigen:

- ? Es sollte genug Zeit und Handlungsspielraum vorhanden sein, um Veränderungen im Untersuchungsprogramm durchführen zu können. Dann könnten nämlich z.B. vom Bagger einzelne Blöcke kontrolliert abgeworfen und dabei gefilmt werden (Vorteil: keine Staubwolke), während des Abbaus in der Halde kartiert werden (mit mindestens 1 Tag Pause wegen der Nachbruchgefahr) und Meßmarken aufgestellt werden (siehe Kapitel 7). Dies ist natürlich nicht zuletzt eine Frage der Finanzierbarkeit.
- ? Wenn möglich sollten Kameras so aufgestellt werden, daß sie die Sturzbahn im Profil aufnehmen können.
- ? Potentiell große Gefährdungen gehen nicht so sehr von dauernd aktiven Schutthalden aus (dort kennt man das Ausmaß der Gefahr ja ohnehin). Vielmehr sollte labilen Wänden, die über längere Zeit geruht haben, besonderes Augenmerk geschenkt werden, da in diesen Fällen die Bevölkerung und die Raumplanung weniger mit Felsstürzen rechnet. Außerdem sind die Reichweiten auf von Feinmaterial (Humus) bedeckten Hängen (geringe Rauigkeit) bedeutend größer, und Sturzblöcke können evtl. bis in bebauten Gebiet

vordringen. Daher sollte der regelmäßigen Begehung von potentiellen Abbruchgebieten besonderes Augenmerk geschenkt werden.

- ? Es sollten sowohl kleine Steinschlagereignisse (wenige m^3) als auch größere Felssturzereignisse (mehrere $1000m^3$) dokumentiert werden, um die Unterschiede (gegenseitige Beeinflussung der Blöcke) besser erfassen zu können (in Japan wurden solche Tests 2000 begonnen). Auch ist es aus statistischen Gründen erforderlich, möglichst viele Sturzbewegungen auswerten, um insignifikante Daten ausscheiden zu können. Dennoch bleiben Blöcke mit außergewöhnlich großer Reichweite für Planungen und Bemessungen besonders relevant.
- ? Ein exaktes Geländemodell ist eine Grundbedingung für aussagekräftige Ergebnisse. Nachträgliche tachymetrische Einmessung von Detailpunkten sowie Überprüfung auf Plausibilität im Gelände können die Brauchbarkeit eines photogrammetrisch erstellten Geländemodells enorm erhöhen.

Da in vielen Gebirgsgegenden der starke Siedlungsdruck vermutlich anhalten wird, wird es weiterhin von großer Wichtigkeit sein, das Gefährdungspotential von Grundflächen bewerten zu können. Dies führt bei flächendeckender Anwendung zu Gefahrenkarten, wie sie beispielsweise in Mitteleuropa im Aufbau begriffen sind. Darüber hinaus sind gefährdete Bauwerke wie z.B. Straßen und Eisenbahnlinien durch zutreffend bemessene Bauwerke wie Steinschlagnetze und Galerien zu schützen. Betroffen von Felsstürzen sind insgesamt Besitzer von Grundstücken und Bauwerken, Raumplaner (Bürgermeister!), Errichter und Verwalter von Verkehrswegen und letztlich auch Versicherungsgesellschaften.

Steinschlag- und Felssturzs simulationsprogramme werden dafür weiterhin ein wichtiges Hilfsmittel für Planer und Ingenieure sein, da damit auf einfache Weise relativ schnell Aussagen zur Gefährdung eines Objekts gemacht werden können. Allerdings hat der Anwender die Verantwortung, erstens zutreffende Parameter zu verwenden und zweitens die Ergebnisse mit Vorsicht zu bewerten. Dies erfordert große Erfahrung und Kenntnis des Fachgebiets, sodaß diese Aufgabe mittelfristig weiterhin nur an Spezialisten vergeben werden darf – ersetzen können die Computerprogramme diese nicht. Anwendung in Unkenntnis der Grundlagen kann zu Fehlinterpretationen führen, die Menschenleben kosten können.

11. Literaturverzeichnis

- ABELE, G. (1974): *Bergstürze in den Alpen*. Wissenschaftl. Alpenvereinshefte 25, München.
- ARTINI, E., PARONUZZI, P. (1999): *Un nuovo programma in ambiente Windows per la modellazione della caduta massi*. Geologia tecnica & ambientale, 1999, Nr.1., Consiglio Nazionale dei Geologi, Roma. In:
http://www.geologi.it/cng/gta/gta_99-1b.htm (30.4.2002).
- AZZONI, A., DE FREITAS, M.H. (1995): *Experimentally gained parameters, decisive for rockfall analysis*, Rock Mechanics and Rock Engineering Bd.28, Nr.2, Springer, Wien, S. 111-124.
- AZZONI, A., LA BARBERA, G., ZANINETTI, A. (1995): *Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Bd.32, Nr.7, October 1995, Elsevier, Oxford, S.709-724.
- AZZONI, A., ROSSI, P.P., DRIGO, E., GIANI, G.P., ZANINETTI, A. (1991): *In situ observation of rockfall analysis parameters*. In: BELL, H. (Hrsg.) (1991), *Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides in Christchurch*, Bd.1, Balkema, Rotterdam, S.307-314.
- BOZZOLO, D. (1987): *Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag*. Dissertation Nr. 8790 an der ETH Zürich.
- BROILLI, L. (1974): *Ein Felssturz im Großversuch*.- Rock Mechanics, Supplementum 3, S.69-78, Springer, Wien
- BRUSCHI, A. (2002): *Presentazione del modello PCMassi*. Giornata di studio su rotolamento massi e opere di difesa passiva Presentazione modelli di calcolo; 07.03.2002, Aosta. Univ. Torino.
- CHAU, K.T., WONG, R.H.C., WU, J.J. (2002) *Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Bd. 39, Pergamon, Oxford, S.69-77.
- ERISMANN, T.H., ABELE, G. (2001): *Dynamics of rockslides and rockfalls*, Springer, Heidelberg, Berlin.
- EVANS, S.G., HUNGR, O. (1988): *Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards*. In: BONNARD, C. (Hrsg.) (1988): *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*, Bd.1, Balkema, Rotterdam, S.685-690.
- GERBER, E., SCHEIDEGGER, A.E. (1974): *On the dynamics of scree slopes*. Rock Mechanics 6. Springer, Wien, S.25-38.
- GUZZETTI, F., CROSTA, G.B., DETTI, R., AGLIARDI, F. (2002): *Stone: a computer program for the three dimensional simulation of rockfalls*. Computers & Geosciences, Bd.28, No.9, Pergamon, Oxford, S.1079-1093.
- HEIM, A. (1932): *Bergstürze und Menschenleben*. Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, Nr.20, Jahrgang 77.
- JOHN, K.W., SPANG, R.M. (1979): *Steinschläge und Felsstürze. Voraussetzungen – Mechanismen – Sicherungen*. Vortrag UIC-Tagung, Kandersteg. In: MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28, S.48.

- JONES, C.L., HIGGINS, J.D., ANDREW, R.D. (2000): Colorado Rockfall Simulation Program Version 4. User Manual. Misc. Series (MI 65), Colorado Geological Survey, Denver, CO.
- KEUSEN, H.R., LINIGER, M. (1999, unveröff.): *Sanierung Felssturzgefahr am Jochschrofen*. Technischer Bericht Felssprengung der Fa. GEOTEST AG an das Straßenbauamt Kempten; Zollikofen.
- LIED, K. (1977): *Rockfall problems in Norway*. Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES), Bergamo. Publications Nr.90, S.51-53. In: EVANS, S.G. & HUNGR, O. (1988): *Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards*. In: BONNARD, C. (Hrsg.) (1988): *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*, Bd.1, Balkema, Rotterdam, S.685-690.
- MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28., Institut für Geographie, Innsbruck.
- NINCK, A.C. (1994): *Wissensbasierter und objektorientierter Ansatz zur Simulation von Mensch-Umwelt-Systemen*. Geographica Bernensia G43, Bern. In: MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28, S.73.
- OKURA, Y., KITAHARA, H., SAMMORI, T., KAWANAMI, A.(2000): *The effects of rockfall volume on runout distance*. Engineering Geology Bd.58, Nr.2, Elsevier, Amsterdam, S.109-124
- PÉREZ, F.L. (1998): *Talus fabric, clast morphology, and botanical indicators of slope processes on the chaos crags (California Cascades, U.S.A)*. Géographie physique et Quaternaire, 1998, Bd.52, Nr.1. Univ. de Montréal, S.1-22.
- PFEIFFER, T.J., BOWEN, T.D. (1989): *Computer Simulation of Rockfall*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Nr.26, Bd.1, AEG, Denver, S.135-146.
- PFEIFFER, T.J., HIGGINS, J.D. (1990): *Rockfall hazard analysis using the Colorado Rockfall Simulation*. Transportation Research Record 1288, Transportation Research Board, National Research Council, Washington 1990, S.117-126. In: <http://www.rockeng.utoronto.ca/Anon/table restitution.htm> (3.11.2001)
- POISEL, R., EPPENSTEINER W. (1988a): *A contribution to the systematics of rock mass movements*. In: BONNARD, C. (Hrsg.) (1988): *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*, Bd.2, Balkema, Rotterdam, S.1353-1357.
- POISEL, R., EPPENSTEINER, W. (1988b, 1989): *Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich"*. Felsbau 6, Nr.4, S.189-194, Essen. *Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems "Hart auf Weich"*. Felsbau 7, Nr.1, Glückauf, Essen, S.16-20.
- ROBOTHAM, M.E., WALTON, G., WANG, H. (1995): *Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes*. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Nr.104, S.A25-A33. In: <http://www.rockeng.utoronto.ca/Anon/table restitution.htm> (3.11.2001)
- SCHEIDEGGER, A.E. (1975): *Physical aspects of natural catastrophes*. Amsterdam, Oxford, New York. In: MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28, S.50.

- SCHELLER, E. (1970): *Geophysikalische Untersuchungen zum Problem des Taminsrer Bergsturzes*. Dissertation Nr.4560, ETH Zürich. In: MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28, S.55.
- SCHMID, H., VON POSCHINGER, A. (1999, unveröff.): *Felssturzgefahr an der B308 Oberjochstraße*. Gutachten des Bayrischen Geologischen Landesamtes an das Straßenbauamt Kempten.
- SCHOLZ, H. (1995): *Bau und Werden der Allgäuer Landschaft*. 2.Auflage, Schweizerbart, Stuttgart.
- SCIOLDO, G. (1991): *Rotomap: analisi statistica del rotolamento dei massi*. Guida informatica ambientale, Pàtron, Milano, S.81-84.
In: <http://pc-ambiente.como.polimi.it/model/schede/ROTOMAP.htm> (30.4.02.)
- SIMET, C., THOM, P. (1990, unveröff.): *Geologische Kartierung im Einzugsgebiet des Rothplatten- und Hirschbachs nördlich Hindelang*. Bericht an das Bayrische Landesamt für Wasserwirtschaft.
- SPANG, R.M. (1987): *Protection against rockfall – stepchild in the design of rock slopes*. In: HERGET, G., VONGPAISAL, S. (Hrsg.) (1987): *Proceedings of the 6th congress of the International Society for Rock Mechanics in Montreal*, Bd.1, Balkema, Rotterdam, S.551-557.
- SPANG, R.M., RAUTENSTRAUCH, R.W. (1988): *Empirical and mathematical approaches to rockfall prediction and their practical applications*. In: BONNARD, C. (Hrsg.) (1988): *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*, Bd.2, Balkema, Rotterdam, S.1237-1243.
- SPANG, R. M. & KRAUTER, E. (2001): *Rockfall Simulation - a State of the Art tool for Risk Assessment and Dimensioning of Rockfall Barriers*. - United Engineering Foundation, International Conference on Landslides, Davos, Glückauf, Essen, S.607-613.
- SPANG, R. M. (2002d): *Rockfall Simulation by ROCKFALL 6.1*. Giornata di studio su rotolamento massi e opere di difesa passiva, Presentazione modelli di calcolo; 07.03.2002, Aosta. Univ. Torino.
- STATHAM, I. (1979): *A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and field experiments*. Int. Colloquium on Physical and Geomechanical Models, ISMES Bergamo, S. 237-258. In: ZINGGELER, A. (1989): *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Modellierung der relevanten Teilprozesse*, Diplomarbeit Univ.Bern, Geogr.Inst.
- STEVENS, W.D. (1998): *ROCFALL: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*. Master Thesis Dept. of Civil Engineering, Univ. of Toronto. In: <http://www.rockeng.utoronto.ca/roc/Papers.htm> (30.4.02.)
- VAN DIJKE, J.J., VAN WESTEN, C.J. (1990): *Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS*. In: ITC Journal 1990, Nr.1, ITC, Enschede, S.40-44. In: MEISSL, G. (1998): *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen*. Dissertation an der Universität Innsbruck. Innsbrucker Geographische Studien, Bd.28, S.144.
- ZINGGELER, A. (1989): *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Modellierung der relevanten Teilprozesse*, Diplomarbeit Univ.Bern, Geogr.Inst.

12. Anhang

12.1. Profilschnitte

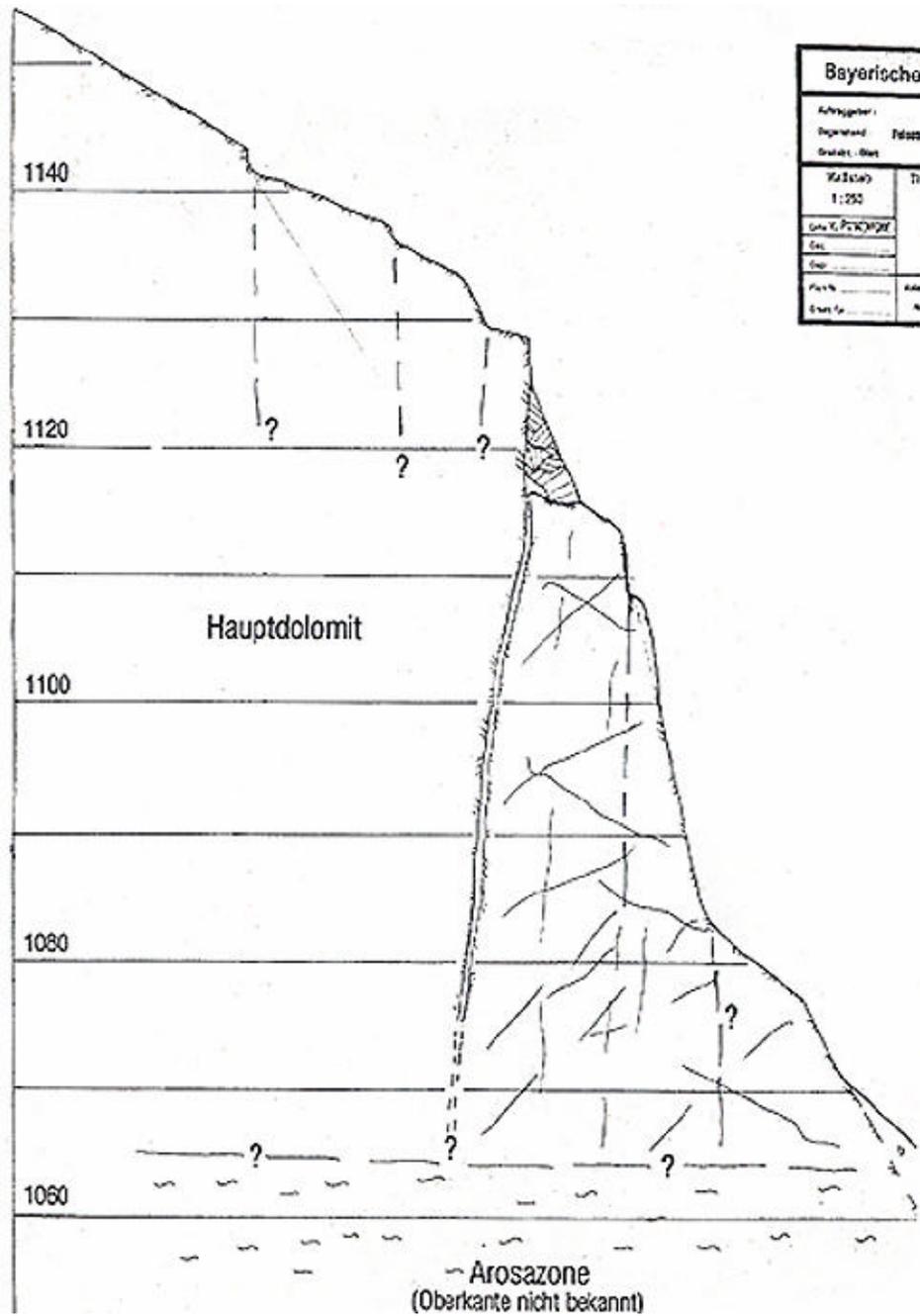


Abb. 29 Profil Kleiner Jochschrofen hinter dem Hauptturm. Quelle: SCHMIDT & VON POSCHINGER (1999), Profil 1 (Lage: siehe Karten).

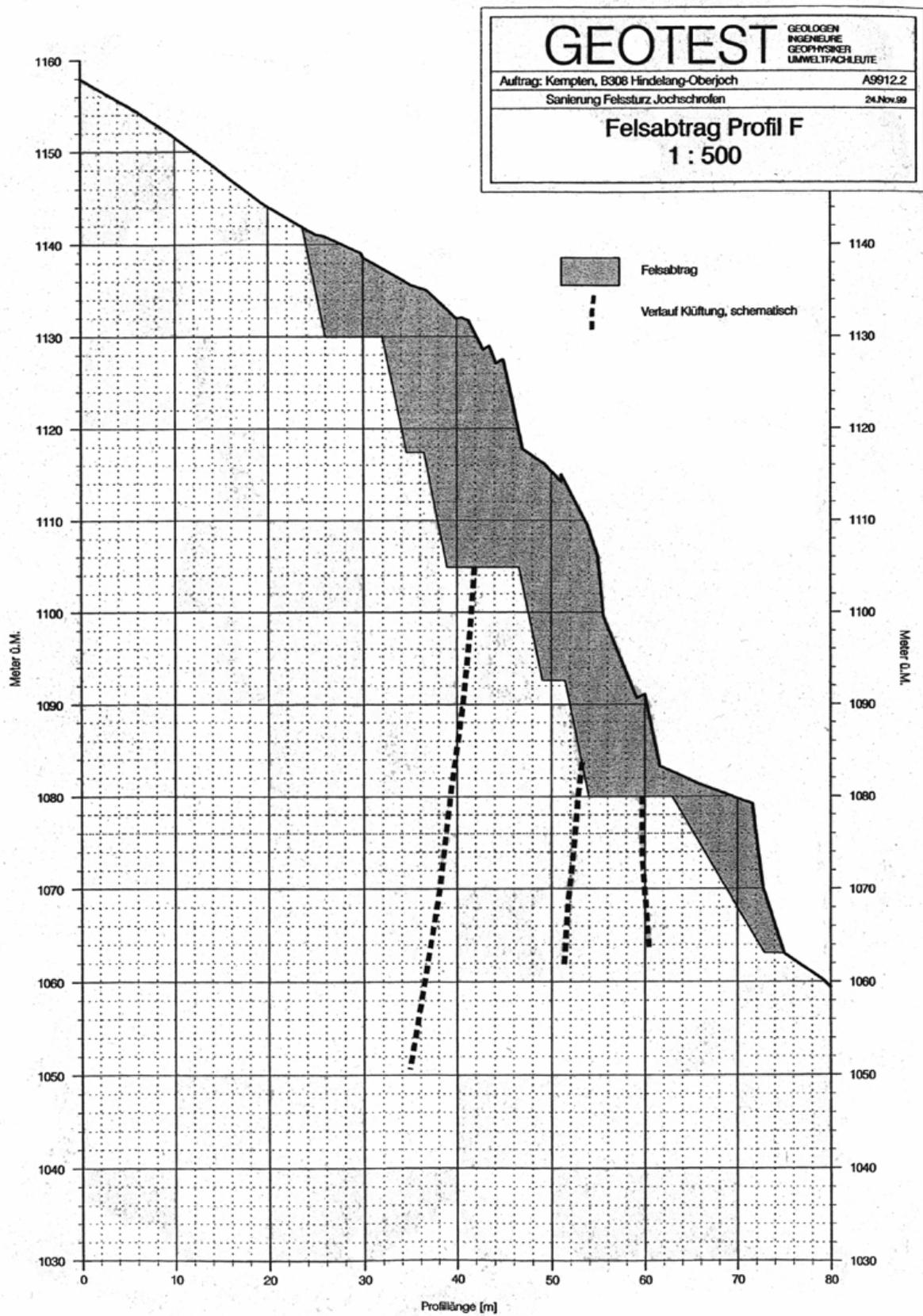


Abb. 30 Geplanter Abbau, Spalten schematisch. Quelle: Fa.GEOTEST (1999), Beilage 8 (Lage: siehe Karten).

12.2. Beobachtete Reichweiten

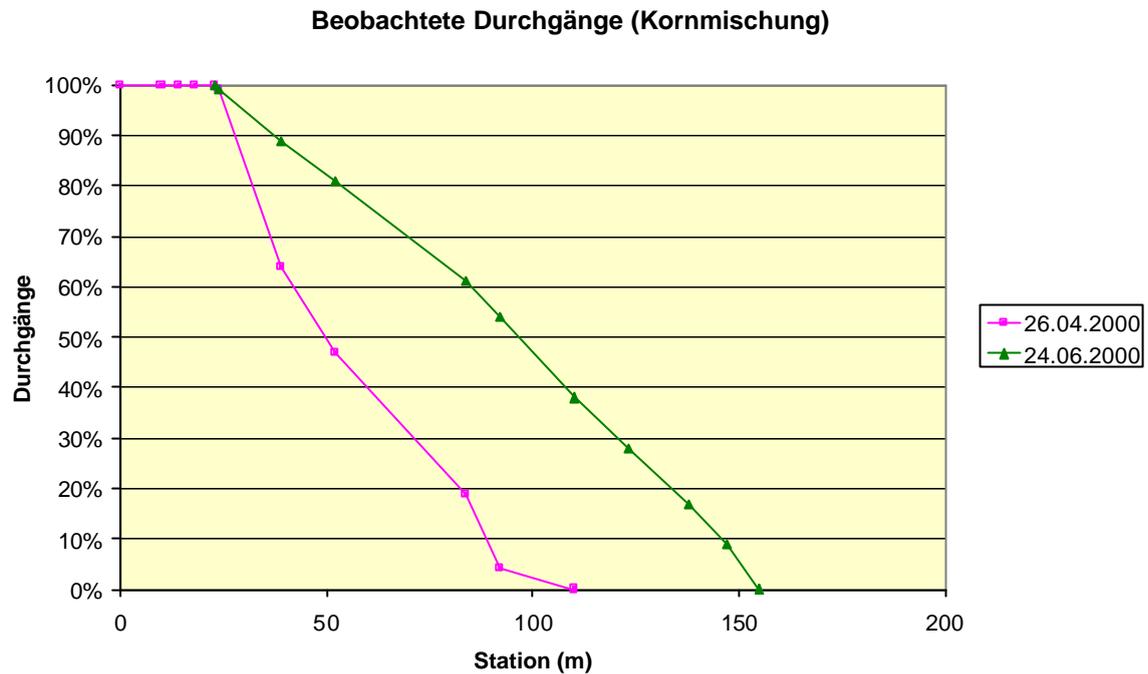


Abb. 31: Beobachtete Durchgänge von April bis Juni 2000

12.3. Simulationsergebnisse

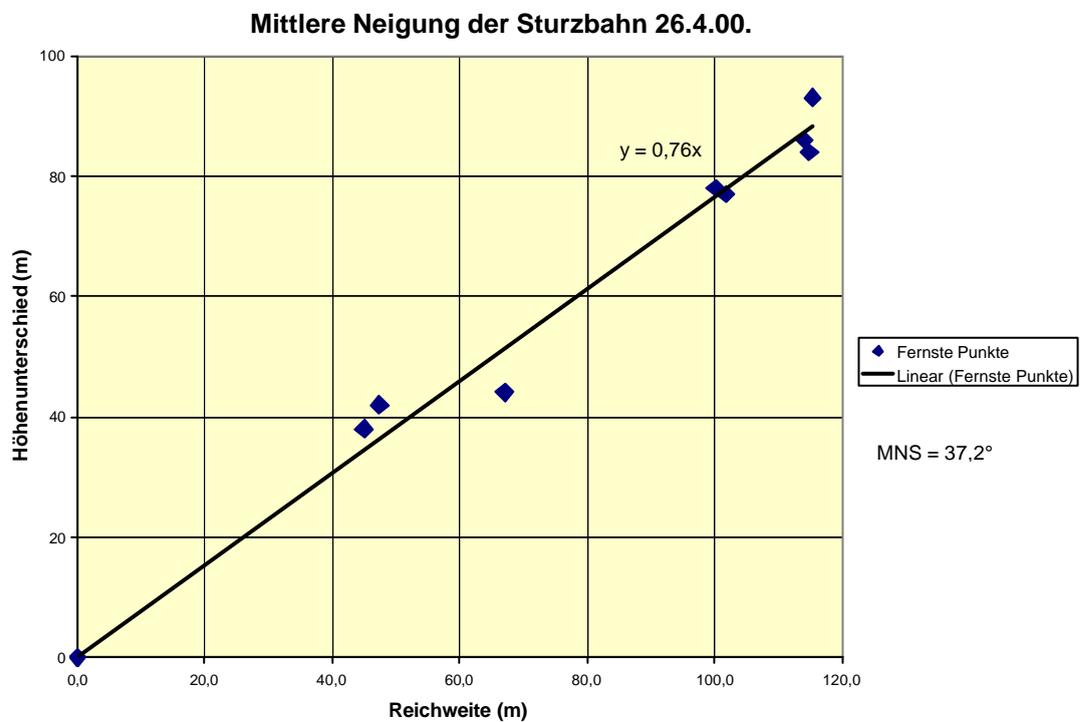


Abb. 32: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: April 2000

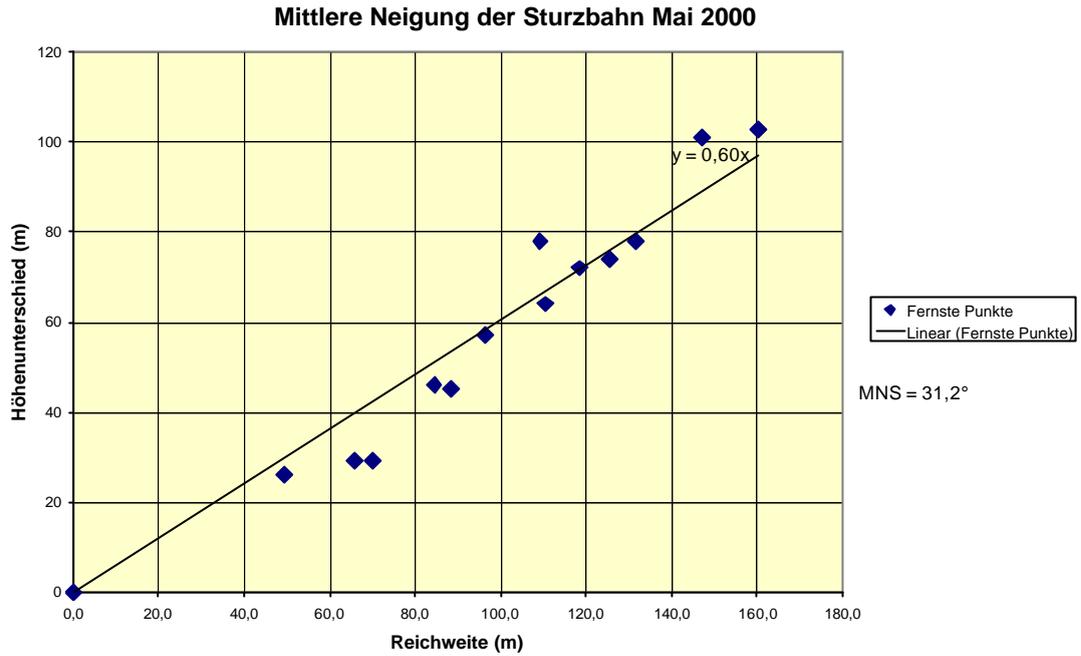


Abb. 33: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: Mai 2000

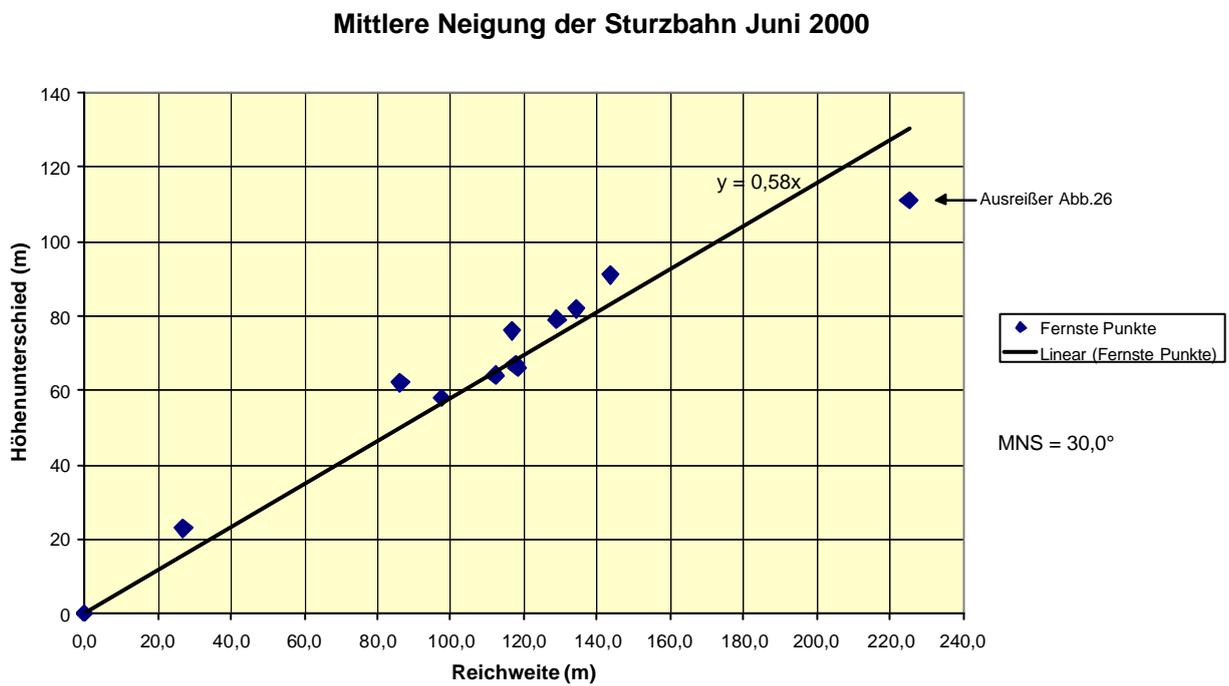
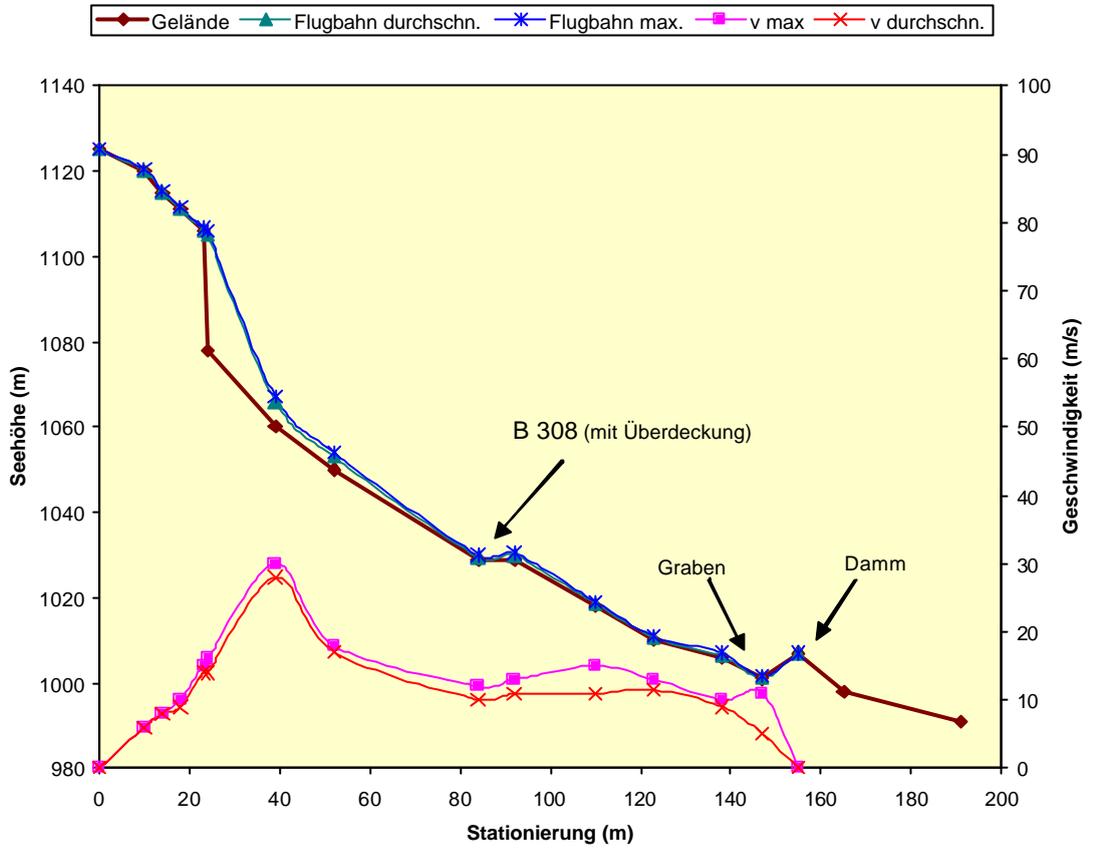


Abb. 34: Ergebnis nach dem Ansatz der MNS: Juni 2000

**Sprengung 26.4.2000, Simulation ROFMOD3
Block 1,4t, realistische Böschungsparameter**



Parameter in der Böschung

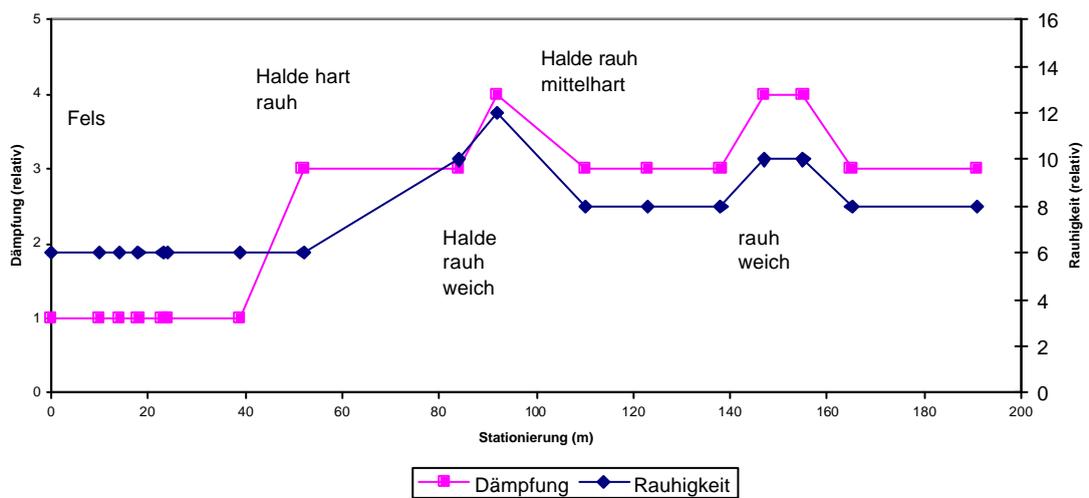


Abb. 35: Ergebnis nach ROFMOD3 26.4.00. realistische Werte

**Sprengung 26.4.2000, Simulation ROFMOD3
Block 1,4t, manipulierte Böschungsparameter**

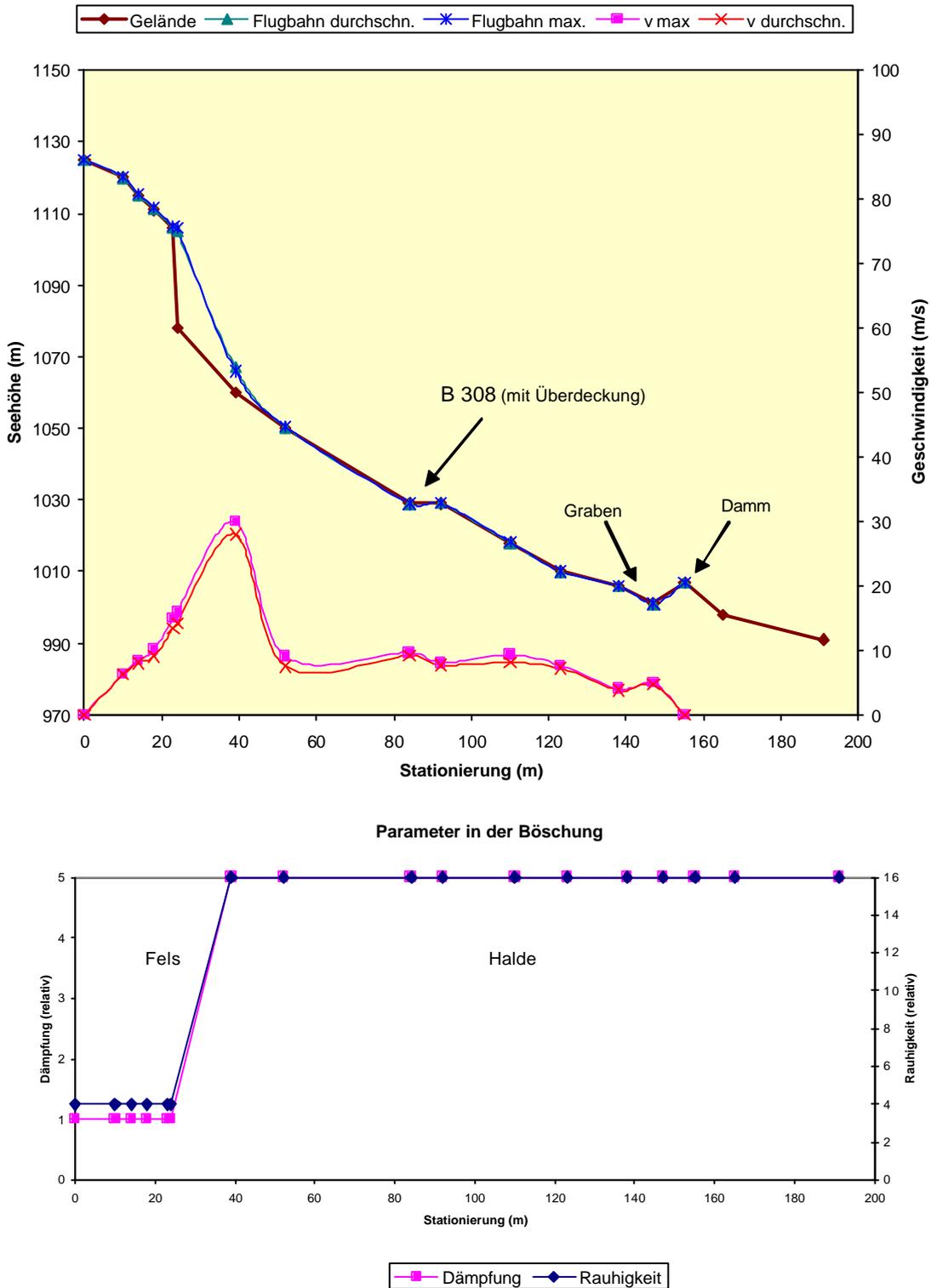
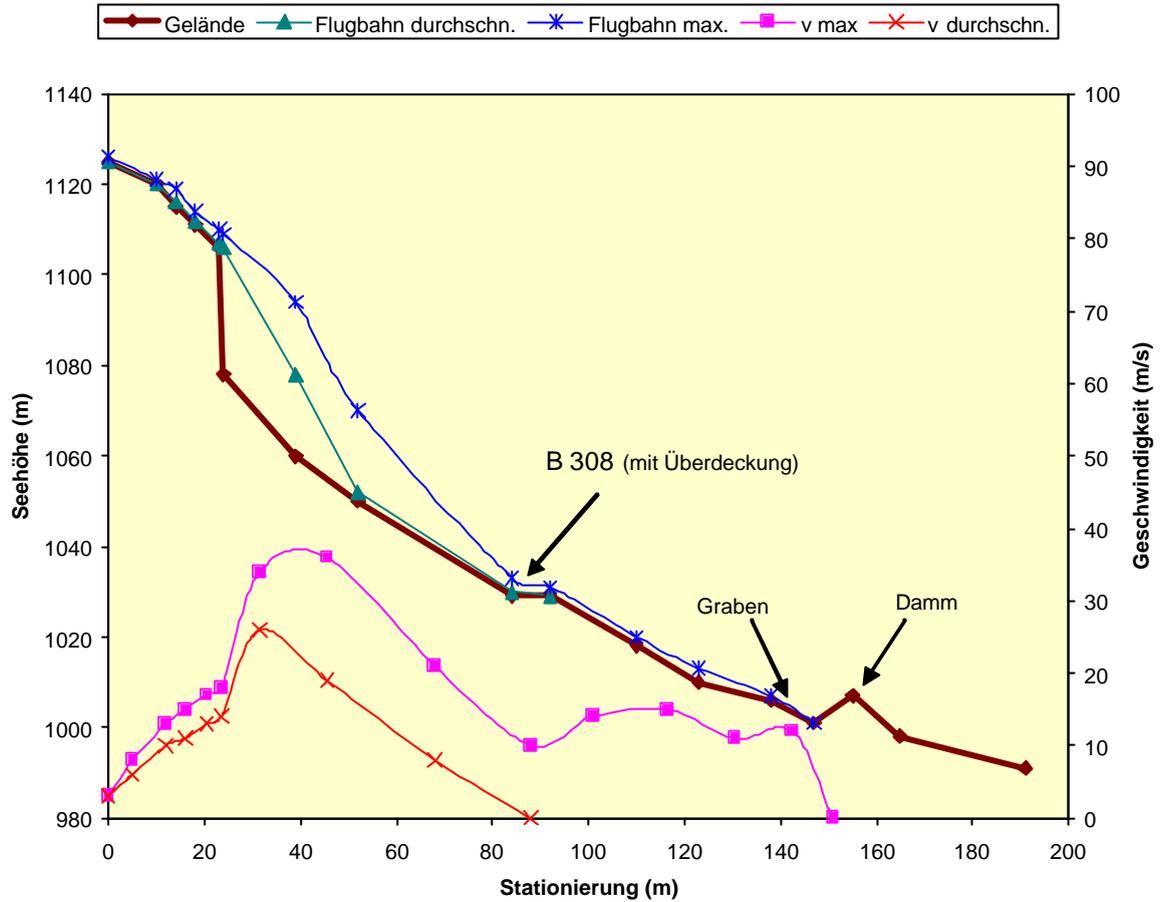


Abb. 36: Ergebnis nach ROFMOD3 26.4.00. manipulierte Werte

Sprengung 26.4.2000, Simulation CRSP3
Block 1m / 1,4t



Kennwerte in der Böschung

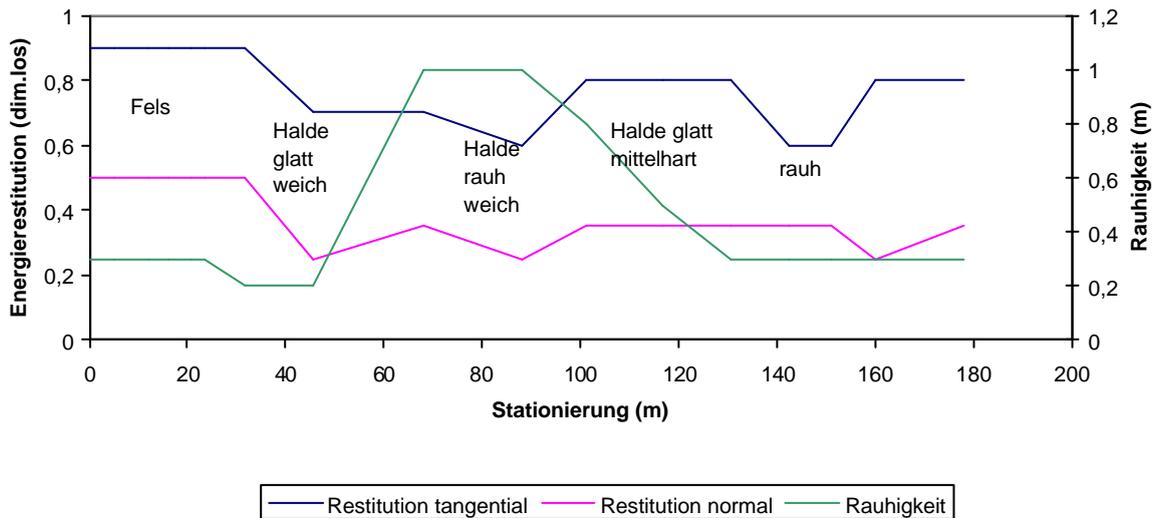
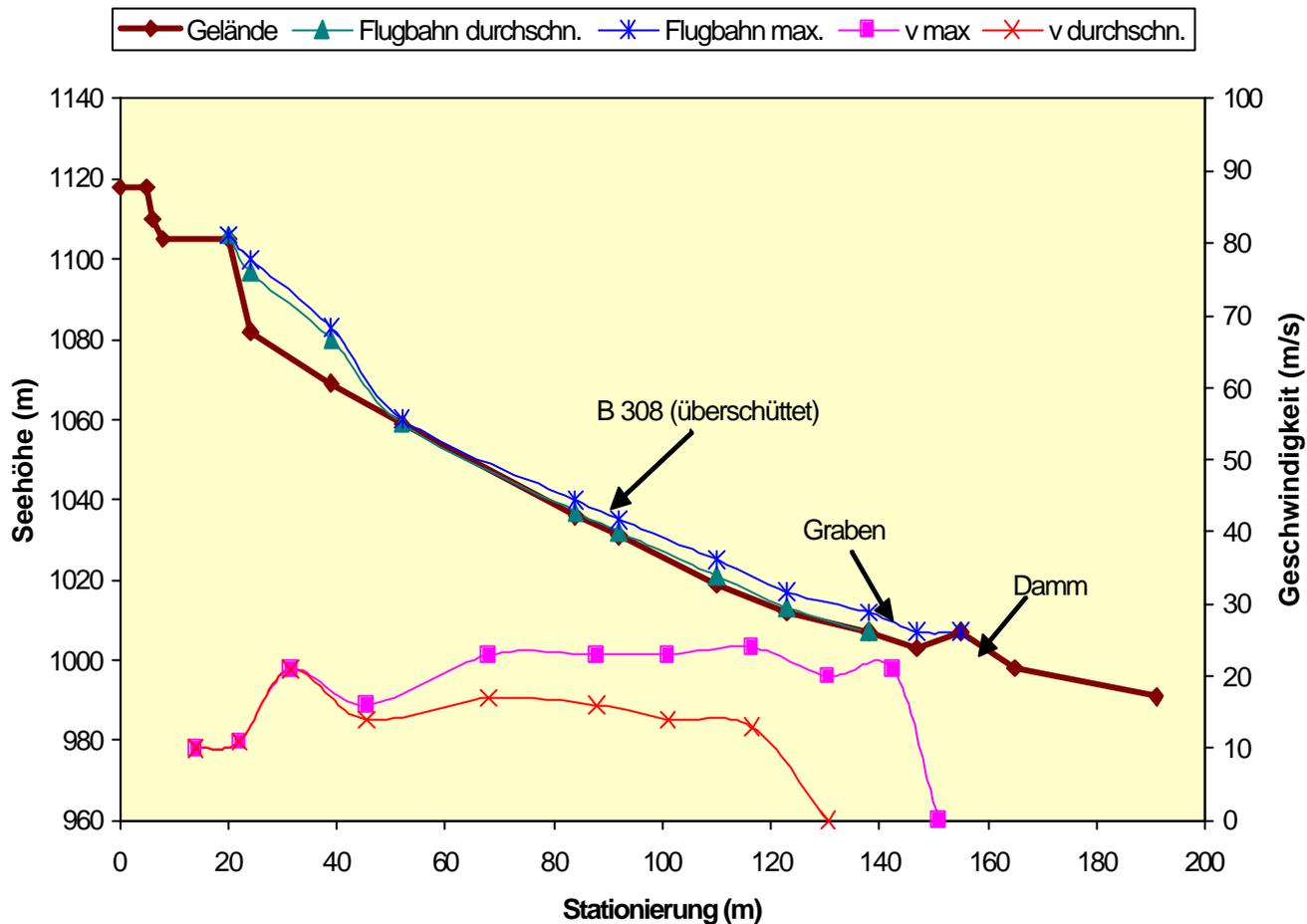


Abb. 37: Ergebnis 26.4.00. nach CRSP3

**Sprengung 24.6.2000, Simulation CRSP3
Block 1m / 1,4t**



Restitutionsfaktoren in der Böschung

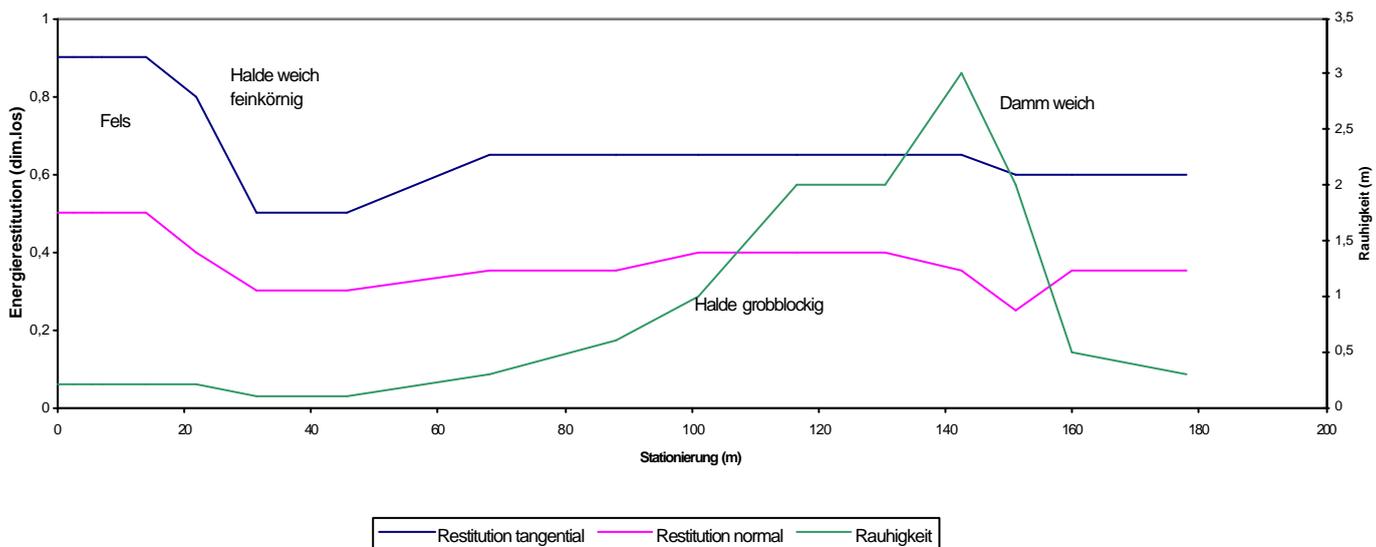


Abb. 38: Ergebnis 24.6.00. nach CRSP3, Block 1,4t

Sprengung 24.6.2000, Simulation CRSP3

Block 200t / 5m

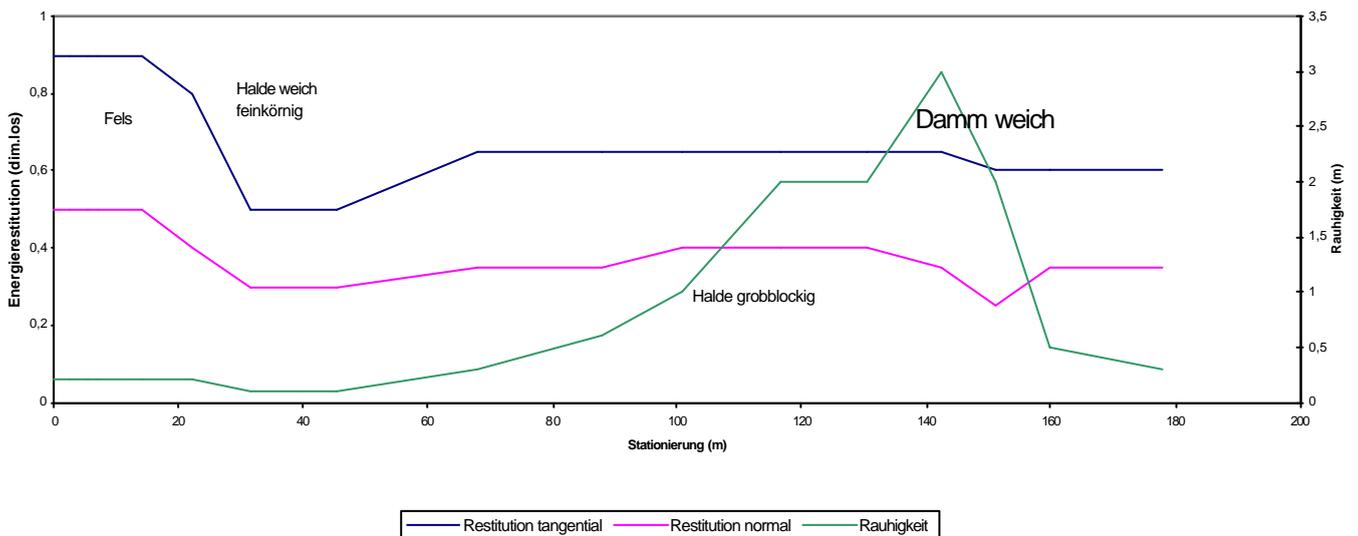
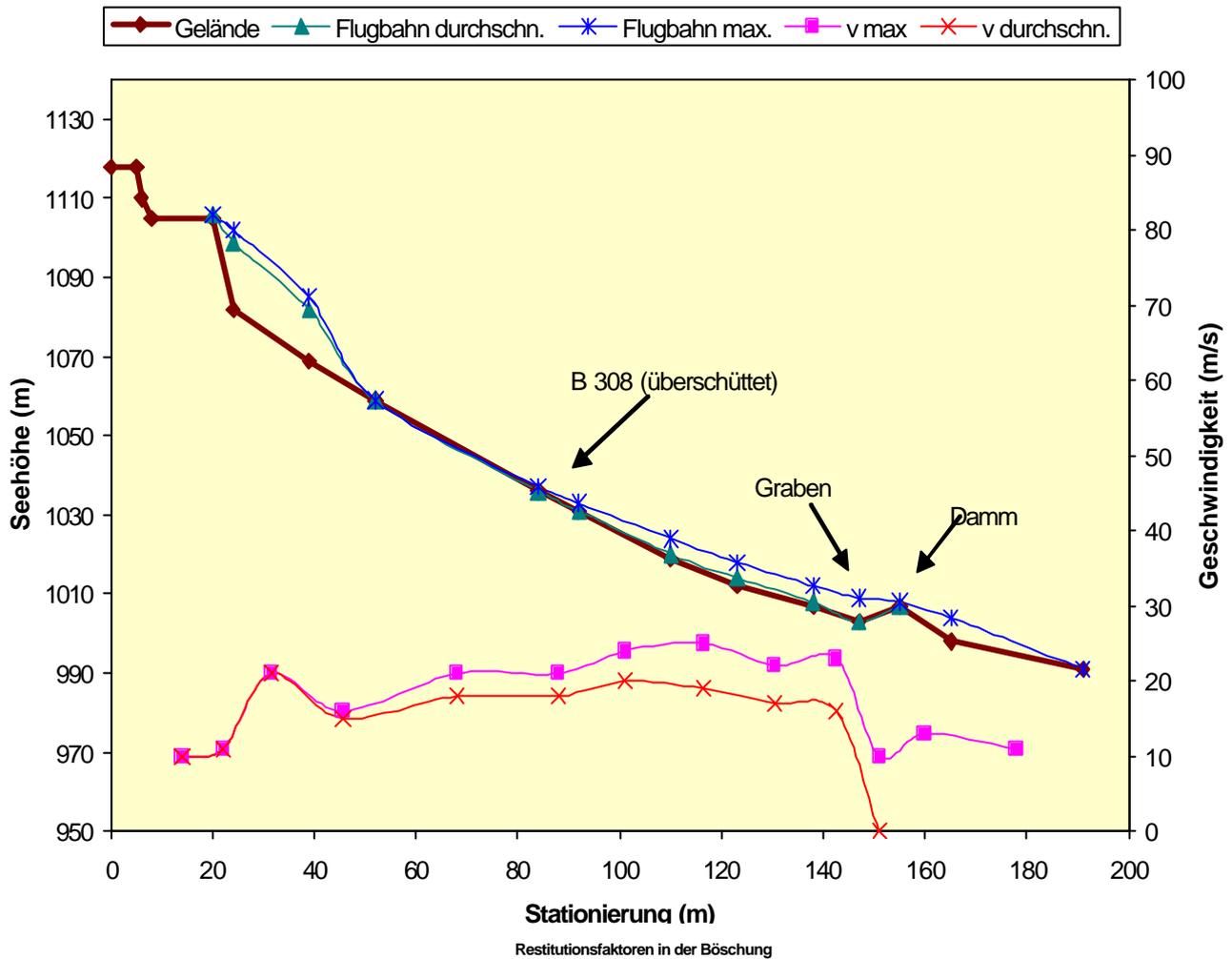


Abb. 39: Ergebnis 24.6.00. nach CRSP3, Block 200t

12.4. Karten

Abb. 40: vom Verfasser verbessertes DHM mit Situation, Bachläufen und eingemessenen Paßpunkten

Abb. 41: ursprüngliches DHM der TU München, Detail des Schrofens

Abb. 42: vom Verfasser verbessertes DHM: Detail des Schrofens mit Störungen (blau)

Abb. 43: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte April mit entsprechender Schutthalde

Abb. 44: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende April mit entsprechender Schutthalde

Abb. 45: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte Mai mit entsprechender Schutthalde

Abb. 46: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende Mai mit entsprechender Schutthalde

Abb. 47: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Mitte Juni mit entsprechender Schutthalde

Abb. 48: vom Verfasser verbessertes DHM: Abbaustadium Ende Juni mit entsprechender Schutthalde

12.5. Videofilm über die Abtragsarbeiten auf DVD-ROM

Ein Zusammenschnitt der Sprengungen, Felsstürze und Impressionen aus der Umgebung wurde mit Reinhard LORENZ vom Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen der Universität für Bodenkultur Wien erstellt. Die Aufnahmen wurden mittels digitaler Videokameras gemacht und digital geschnitten. Der Film hat eine Dauer von 15min. und liegt als DVD-ROM in einer Tasche dieser Arbeit bei. Auf Anfrage können weitere Exemplare erworben werden (auch als VHS-Band).