



## 1 Einleitung

Im Zentralen Element 1 wurde das Trennflächengefüge des Scharfenfels aufgenommen und die Stabilität konzeptionell diskutiert. Im vorliegenden Zentralen Element 2 versetzen wir uns in die Zeit vor dem Felssturz zurück und untersuchen, ob dieser vorauszusehen war, bzw. was für Auflagen dem Steinbruchbesitzer hätten gemacht werden müssen, um ein Versagen zu verhindern.

Aus den Dokumenten des Stadtarchivs geht hervor, dass die betreffende Felsböschung stark rutschverdächtig war, so dass die Behörden den Bau von Einfamilienhäusern in unmittelbarer Nähe nicht genehmigten. Der Betrieb eines Steinbruchs am Böschungsfuss wurde jedoch zugelassen. Das Abgleiten der instabilen Felsmassen ereignete sich nach Aufnahme des Abbaus im Bereich C (Fig. 1a). Nach dem Versagen (Fig. 1c) wurden zur Sicherung der verbliebenen Böschung weitere Felsbereiche abgetragen. Die Situation im heutigen Zustand ist in Fig. 1d dargestellt.

Die Untersuchung einer solchen Fragestellung gliedert sich üblicherweise in zwei Teile: In einem ersten Schritt erstellt man ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit (Modell), welches an bekannten Gegebenheiten geeicht wird. In einem zweiten Schritt werden am Modell mathematische Untersuchungen zur Klärung der Fragestellung durchgeführt. Die vorliegende Aufgabe hält sich ebenfalls an diesen Ablauf.

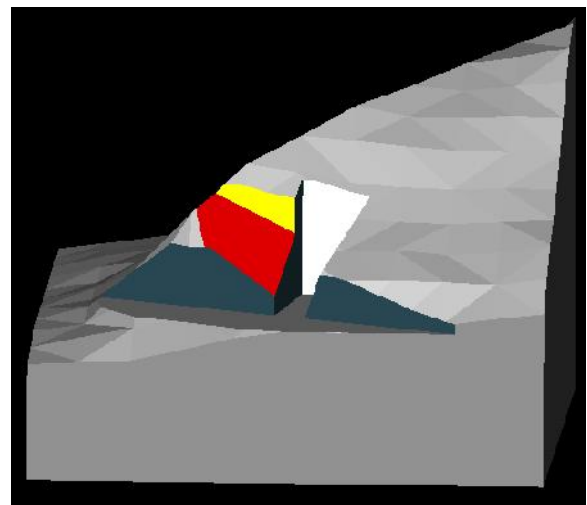
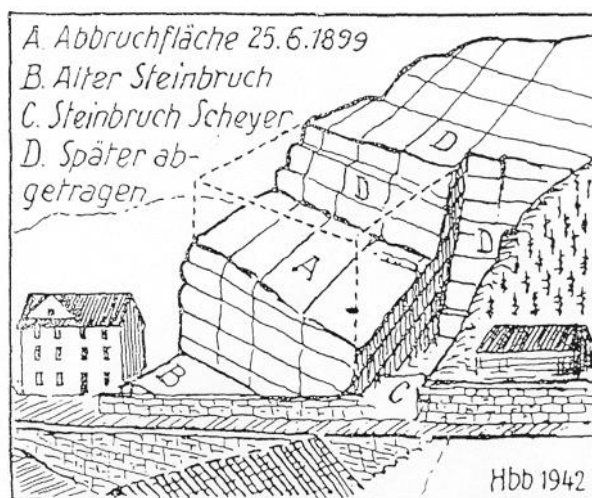
Solche Fragestellungen können prinzipiell mit jedem Böschungsstabilitätsprogramm untersucht werden (z.B. auch mit den Freeware Programmen des IGT, kopierbar via <http://www.fritz.ch:8080/?publ=3>). Allerdings wurde am Institut für Geotechnik ein Programm namens AutoBlock speziell für die Analyse solcher Probleme entwickelt, welches den nötigen Aufwand für den Ingenieur auf einen Bruchteil reduziert, bzw. in komplizierteren Fällen eine Analyse erst ermöglicht. Deshalb wird die vorliegende Aufgabe mit dem Programm AutoBlock durchgeführt.

Zur Einführung in AutoBlock wird mit der Übungsabgabe eine einstündige allgemeine Übersicht gegeben und der Gebrauch von AutoBlock anhand eines einfachen Beispiels erklärt. Ein ähnliches Beispiel ist auch im Helpfile von AutoBlock unter dem Titel *Illustrative Example* enthalten. Eine Kurzversion dieser Einführung kann auch jederzeit via <http://www.fritz.ch:8080/?event=81> nochmals betrachtet werden. In einer zweiten Stunde wird die Aussagekraft von AutoBlock mit einem Beispiel aus der Ingenieurpraxis illustriert und die wichtigsten Punkte der Aufgabe besprochen.

## 2 Aufgabenstellung

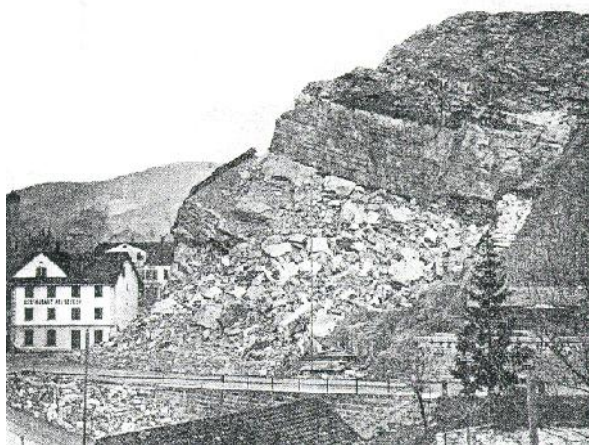
In einem **ersten Teil** wird das Gelände Scharfenfels vor dem Felssturz untersucht. Zu diesem Zeitpunkt war der Sicherheitsfaktor mindestens eins. Basierend auf der Wirklichkeit wird ein Modell erstellt und mit diesem Werte für die Kohäsion  $c$  und den Reibungswinkel  $\phi$  bestimmt, die diesem Sicherheitsfaktor genügen.

Im **zweiten Teil** wird der Steinbruch in das Modell eingeführt und der Sicherheitsfaktor für die vorher bestimmten Wertepaare von  $c$  und  $\phi$  berechnet. Dazu muss analysiert werden, welche neuen Bruchmechanismen durch die Einführung des Steinbruchs zu erwarten sind.



a) Skizze Scharnenfels  
(Haberbosch, 1942)

b) Modellierung mit AutoBlock



c) Unmittelbar nach Versagen  
(Haberbosch, 1942)

d) Heutige Situation

Fig. 1: Felssturz Scharnenfels

### 3 Hilfsmittel und vorgegebene Daten

1. Das Zentrale Element 2 ist mit dem am Institut für Geotechnik entwickelten Programm AutoBlock, einem Add-on zu AutoCAD, durchzuführen. Beide Programme sind auf den Studenten PCs installiert (Menu Option Start / Programs / 02 Finite-Elemente / AutoBlock / 03 Run AutoBlock). Eine zeitlich begrenzt lauffähige Version von AutoBlock kann bei Bedarf (z.B. für zu Hause) auch via <http://www.tunnel.ethz.ch/autoblock> herunterkopiert und installiert werden (Link *FTP Server* folgen und dann *Setup.exe* doppelklicken). Vom selben Ort kann auch die vorliegende Übungsbeschreibung heruntergeladen werden.
2. Ebenfalls via <http://www.tunnel.ethz.ch/autoblock> sind verschiedene Online-Tutorials zu Aufbau, Anwendung und Visualisierungsmöglichkeiten von AutoBlock abrufbar. Das Vorgehen der hier erwarteten Berechnungen zum Schartenfels wird in einem Beispiel-Video Schritt für Schritt erklärt.
3. Eine digitalisierte Felsoberfläche, die der Situation Schartenfels nachempfunden ist, kann vom selben Ort, d.h. vom Verzeichnis *Samples / Schartenfels* herunterkopiert werden. Des Weiteren sind dort auch die notwendigen Aushubkörper zur Simulation der Strasse und des Steinbruchs vorhanden (Fig. 2). Diese drei Dateien werden in Kap. 4 unter Punkt 1 bzw. 8 in AutoBlock importiert und müssen deshalb vorgängig auf den lokalen PC herunterkopiert werden.
4. Zusätzlich sind im Verzeichnis *Samples / Schartenfels* noch zwei weitere Dateien abgespeichert: *EmptyProject.dwg* und *EmptyProject.abl*. Wie der Name sagt sind das leere Dateien, die auch direkt in AutoCAD durch Erzeugen eines neuen Projekts kreiert werden können.  
Es wird empfohlen, alle dortigen Dateien auf den Desktop zu kopieren<sup>1</sup> und AutoBlock zu starten mittels Doppelklick auf *EmptyProject.abl*, worauf sofort mit Punkt 1 begonnen werden kann.  
Achtung: der erste Start von AutoCAD kann mehrere Minuten dauern.
5. Daten Oberfläche:  
Einfügepunkt der digitalisierte Geländeoberfläche:  $x/y/z: 0/0/0$   
Einfügepunkt der Strasse:  $x/y/z: 0/0/0$   
Einfügepunkt des Steinbruchs  $x/y/z: 125/60/74$   
Drehung um 30 Grad (Rotationszentrum = Einfügepunkt).
6. Daten Flächengefüge:  
Schichtflächen: Fallrichtung /Fallwinkel: 170/35  
Kluftfläche: Fallrichtung /Fallwinkel: 300/70  
Ablöseflächen: Fallrichtung /Fallwinkel: 210/90

<sup>1</sup> In allen Webbrowsern können einzelne Dateien direkt mit der Maus z. Bsp. auf den Desktop gezogen werden. Ganze Verzeichnisse können evtl. nur im Internet Explorer einfach herunterkopiert werden (via die dort erwähnte Option "Open FTP Site in Windows Explorer").

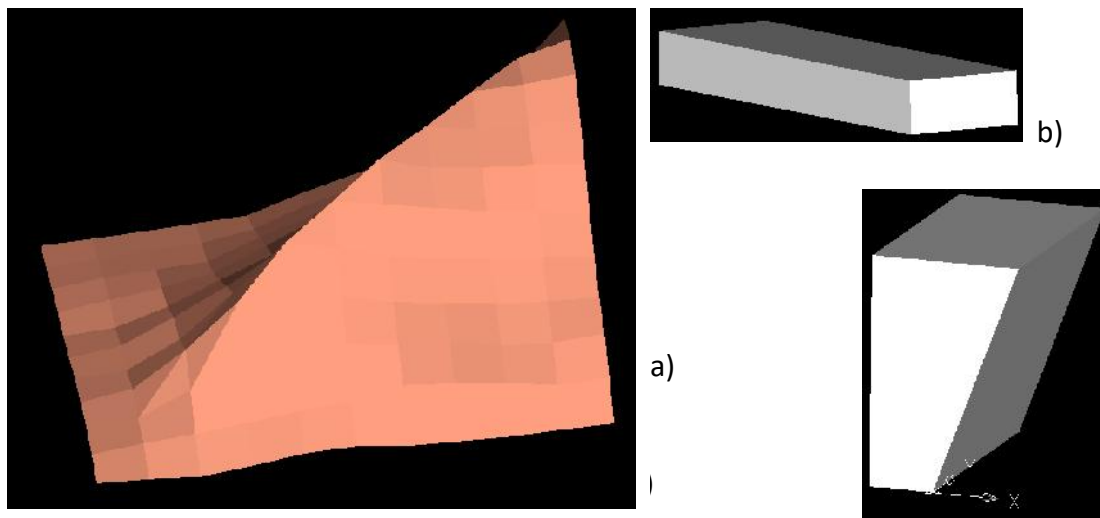


Fig. 2: Vorgegebene digitalisierte Flächen und Körper  
a) Felsoberfläche  
b) Aushub für Strasse  
c) Aushub Steinbruch

## 4 Übungsablauf

### Teil 1: Rückrechnung der Festigkeitswerte (ohne Steinbruch)

#### 1. Erstellung des Digitalen Terrain Modells (DTM) mit Strasse vor Versagen.

Zuerst wird die digitalisierte Felsoberfläche in AutoBlock eingelesen (Fig. 3), und danach das auszuhebende Volumen für die Strasse. Die Strasse wird als *Foundation Body* aufgefasst, welcher vom DTM subtrahiert werden kann. Sie wird bei den Koordinaten 0, 0, 0 eingefügt. Der Zustand der Strasse wird als *Excavated* definiert.

NB: Alle benötigten Eingabedateien sollen wie in Kap. 3 erwähnt vorgängig auf den lokalen PC herunterkopiert werden.

Die Vereinigung der Oberfläche und der Strasse erfolgt mit der AutoBlock Menu Option *Construction* (Fig. 4). Es wird empfohlen, das Resultat in AutoCAD aus verschiedenen Blickwinkeln isometrisch abzubilden (via Menu *AutoBlock / Preferences / Layout / 4 Viewports*).

Zur Visualisierung können die gängigen AutoCAD-Optionen verwendet werden. So lässt sich beispielsweise via Menu *AutoCAD / View / View Styles / Realistic* die Geländeoberfläche nicht als Netz, sondern als Fläche darstellen. Die *Orbit*-Funktion erlaubt zudem eine beliebige Drehung im Raum.

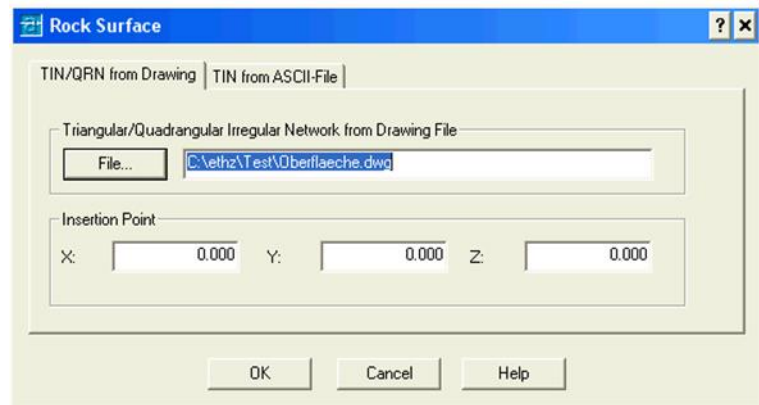


Fig. 3: Einlesen der Geländeoberfläche

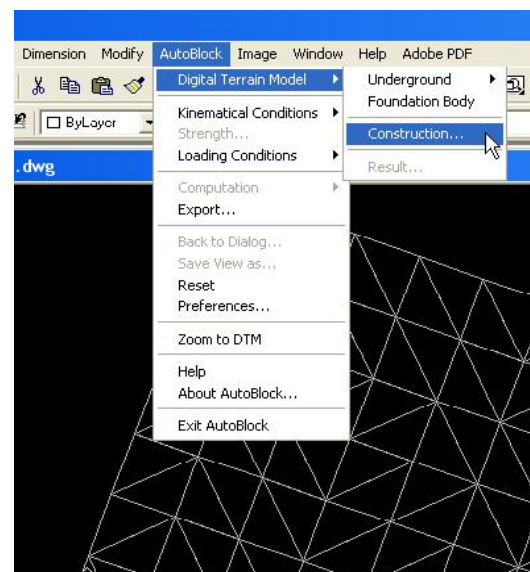


Fig. 4: Konstruktion des DTM



2. Einführen der beiden massgebenden Trennflächenscharen (Schichtflächen und Kluffflächen, die Ablöseflächen werden hier noch nicht benötigt, sie werden erst in Punkt 11 eingeführt).

Die Schichtflächen werden durch eine Fallrichtung von  $170^\circ$  und den Fallwinkel von  $35^\circ$  charakterisiert. Ihre Lage wird im Laufe der Analyse festgelegt bzw. variiert.

Die Kluffflächen werden für die vorliegende Übung nicht variiert. Es wird angenommen, dass das Gebiet des potentiellen Felssturzes am östlichen<sup>2</sup> Rand (C – D im Fig. 1a) durch eine einzelne, im Gelände eindeutig lokalisierbare Klufffläche abgegrenzt wird, die eine Fallrichtung von  $300^\circ$  und einen Fallwinkel von  $70^\circ$  aufweist.

Sowohl die Lage der Referenz-Schichtfläche<sup>3</sup> als auch jene der Klufffläche werden so angenommen, dass sie durch einen Punkt knapp oberhalb des Schnittpunkts der östlichen Seite des Steinbruchs mit der Strasse (auf deren Niveau) gehen.

Zur Bestimmung der Koordinaten dieses Punktes müsste der Steinbruch eingeführt und als *Excavated* spezifiziert, eine *Construction* des DTM durchgeführt und unter *Results* die Koordinaten des gesuchten Punktes mit *Pick Point* abgegriffen werden. Dies ergibt einen Punkt mit x, y, z: 126, 62, 74.10 (Fig. 5), der im Rahmen dieser Übung direkt eingegeben werden kann.

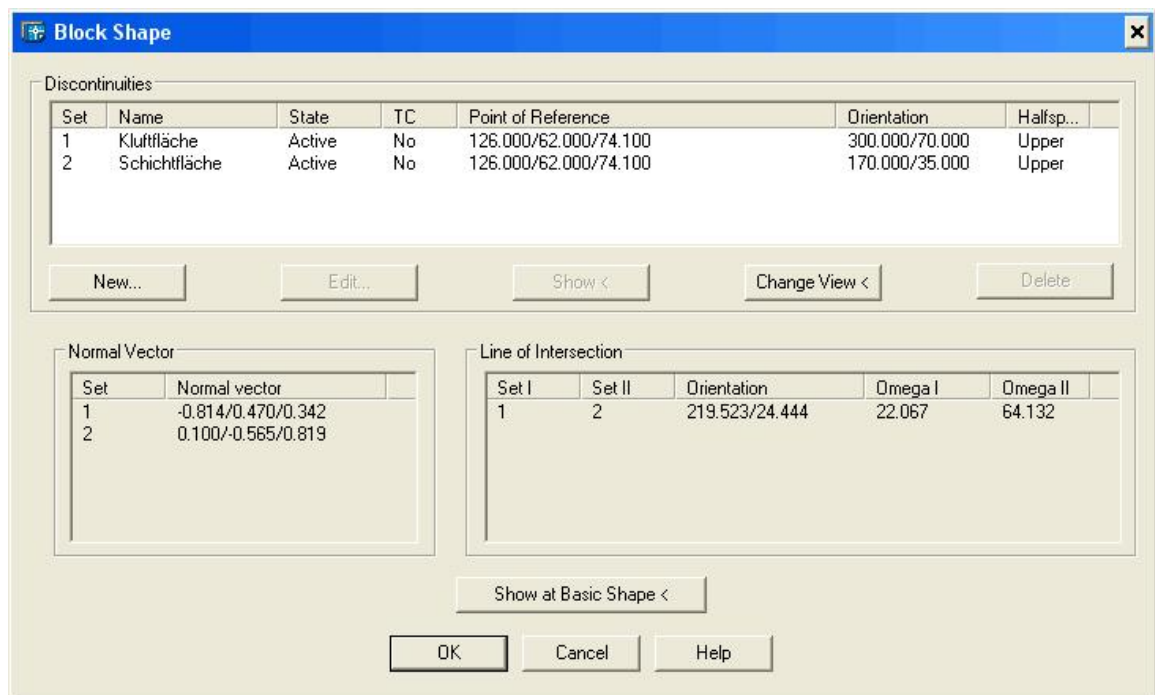


Fig. 5: Die zwei massgebenden Trennflächenscharen

Aus Fig. 5 geht auch die Orientierung der Schnittgerade zwischen den beiden Trennflächenscharen hervor: Ihr Fallwinkel beträgt  $24^\circ$ , d.h. er ist wesentlich kleiner als die Fallwinkel der beiden Trennflächenscharen. Es kann gezeigt werden, dass dieser Fallwinkel für den Sicherheitsfaktor massgebend wird (siehe Publikation <http://www.fritz.ch:8080/?publ=3> oder [publ=19](#)). Dies illustriert die stabilisierende Wirkung eines Keils.

<sup>2</sup> In Übereinstimmung mit der Konvention von AutoBlock zeigt die x-Achse nach Osten, die y-Achse nach Norden und die z-Achse senkrecht nach oben.

<sup>3</sup> Die hier eingegebenen Flächen werden als Referenzflächen bezeichnet. Bei der Bestimmung der potentiellen Bruchkörper werden diese Referenzflächen parallel in einem wählbaren Abstand (*Spacing*) verschoben.

3. Bestimmung aller potentiell gleitgefährdeten Bruchkörper für Schichtflächen in einem Abstand von 10 m und eine feste Lage der Klufffläche.  
Diskussion der Resultate: Welche Bruchkörper interessieren? Warum es keine Scherflächen unterhalb der Referenz-Scherfläche? usw.

Eine Schar von Schichtflächen wird mit dem Menu *Block Size* definiert. Die Klufffläche lässt man *Fixed*, die Schichtfläche wird mit einem Abstand (*Spacing*) von 10 m über das ganze DTM variiert (Fig. 6).

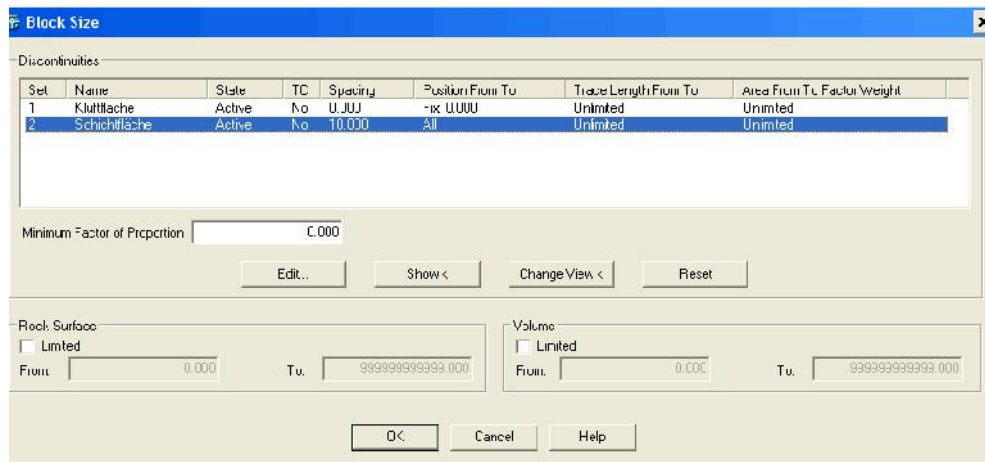


Fig. 6: Definition der Schichtflächenschar mit einem Abstand von 10 m

Mit dem AutoBlock Menu *Examination* werden alle möglichen Kombinationen der Klufffläche mit allen Lagen der Schichtflächen bestimmt und mit dem DTM geschnitten. Alle so bestimmten Körper, die an der Oberfläche ausbeissen (sonst können sie nicht abrutschen), sind potentiell mögliche Bruchkörper und werden in der Resultatdarstellung aufgelistet. Durch Selektieren gewünschter Bruchkörper können diese - oder der Untergrund alleine - visualisiert werden (Fig.7).

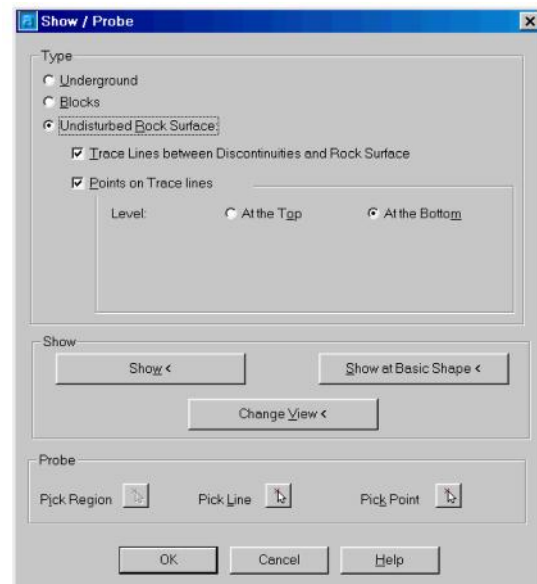


Fig. 7: Visualisierung der Bruchkörper

4. Um den Einfluss der Genauigkeit von geometrischen Eingabedaten zu untersuchen, wird das Azimut der Klufffläche variiert. Dazu wird die Fallrichtung (Azimut) der Klufffläche um  $\pm 10^\circ$  geändert und jeweils die Bruchkörpervolumina berechnet. Welchen Einfluss hat die Variation dieser Eingabe? Was bedeutet dies für die Praxis? Warum tritt die untere Gleitfläche bei  $+10^\circ$  nicht in Erscheinung?



5. Definition der Festigkeitsparameter mit Beantwortung folgender Fragen:  
Wie wird die Masseinheit der Kohäsion eingegeben?

Die Masseinheit der einzugebenden Festigkeitswerte wird zusammen mit dem Ziel der Berechnung (siehe Punkt 7) festgelegt. Als Beispiel kann vorläufig ein Reibungswinkel von  $10^\circ$  und eine Kohäsion von  $50 \text{ kN/m}^2$  für beide Trennflächenscharen eingegeben werden.

6. Definition der Lastgrössen: Für das Übungsbeispiel wird nur ein Eigengewicht von  $26 \text{ kN/m}^3$  berücksichtigt.

Fragen: Nach der Definition der Lastgrössen ist das Menu *Computation* nicht wählbar. Warum? Nach Ausführung von *Determination* ist sie wählbar. Was bewirkt also *Determination*?

7. Rückrechnung der Festigkeitsparameter für den ungünstigsten Bruchkörper von Punkt 3 mit Darstellung in einem  $c / \phi$  Diagramm für Sicherheitsfaktoren 1 und 1.5. Am Schluss Wahl eines Wertepaars für weitere Untersuchungen.

Fragen: Woraus ergibt sich die Orientierung der Gleitrichtung? Was ist massgebend für den grossen Unterschied der Resultate für die obere und die untere Schichtfläche?

Vor diesen Berechnungen ist die Fallrichtung der Kluffläche wieder auf  $300^\circ$  zurückzusetzen.

Für mehrere Wertepaare von  $c$  und  $\phi$  (Eingabe gemäss Punkt 5) lässt man dann AutoBlock den Sicherheitsfaktor gegen Abgleiten berechnen, wobei die Resultate jeweils in ein Diagramm gemäss Fig. 8 eingetragen werden. Aus diesem Diagramm kann dann durch Herauslesen von  $c$  und  $\phi$  für einen bestimmten Sicherheitsfaktor das Diagramm gemäss Fig. 9 erstellt werden.

Man erkennt, dass immer ein Wertepaar von  $c$  und  $\phi$  zu einem bestimmten Sicherheitsfaktor führt. Gibt es Kriterien für die Wahl eines Wertepaars? Was weiss man über den Sicherheitsfaktor im ursprünglichen Zustand?

Die Abklärung des Unterschieds zwischen oberer und unterer Schichtfläche kann grob erfolgen, evtl. unter Zuhilfenahme des Formalismus der Publikationen (<http://www.fritz.ch:8080/?publ=3> oder [publ=19](http://www.fritz.ch:8080/?publ=19)). Es ist leicht einzusehen, dass mit grösserem Gewicht  $G$  der Sicherheitsfaktor abnimmt, mit grösserer Fläche  $F$  aber zunimmt. D.h. im Wesentlichen ist das Verhältnis  $F/G$  massgebend. Wie gross ist dieses Verhältnis für die obere bzw. die untere Schichtfläche?

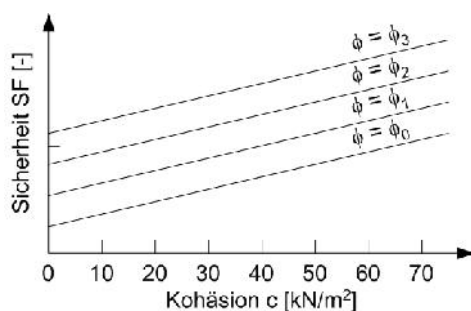


Fig. 8: Sicherheitsfaktor für verschiedene Werte von  $c$  und  $\phi$

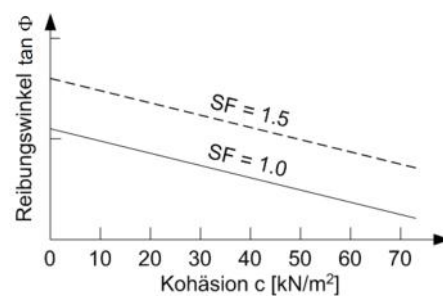


Fig. 9: Reibungswinkels  $\phi$  in Funktion der Kohäsion  $c$  bei gegebenem Sicherheitsfaktor

## Teil 2: Analyse der Stabilität mit Steinbruch

### 8. Neuberechnung des DTMs von Punkt 1 mit Berücksichtigung des Steinbruchs.

Um den Steinbruch im DTM von Punkt 1 zu berücksichtigen, wird dieser (analog zur Strasse) im Einfügekpunkt gemäss Fig. 10 bzw. Kapitel 3 als Foundation Body eingefügt und sein Zustand als *Excavated* definiert.

Die Vereinigung der Oberfläche, der Strasse und des Steinbruchs erfolgt wieder mit dem AutoBlock Menu *Construction*.

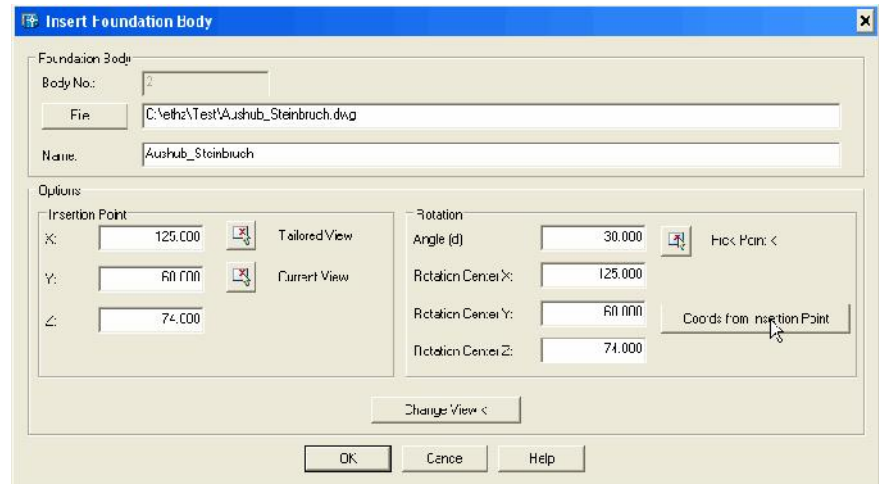


Fig. 10: Einfügen des Steinbruchs

### 9. Neubestimmung aller potentiell gleitgefährdeten Bruchkörper für Schichtflächen in einem Abstand von 10 m und einer festen Lage der Kluffläche (analog Punkt 3).

Fragen: Ist der Bruchmechanismus sinnvoll, bzw. welcher andere käme warum in Frage?

Nach einer Neubestimmung des DTM muss immer auch eine Neuberechnung der kinematisch möglichen Bruchkörper erfolgen. Nach Abgleiten eines Bruchkörpers (Fig. 12) kann im DTM der Untergrund und die Gleitflächen visualisiert werden (Fig. 11). Der Bruchkörper von Fig. 11 weist eine Einschnürung auf, die primär versagensgefährdet ist. D.h. statt einem Abgleiten des ganzen Bruchkörpers ist ein Bruch an dieser Stelle zu untersuchen (in Punkt 11).

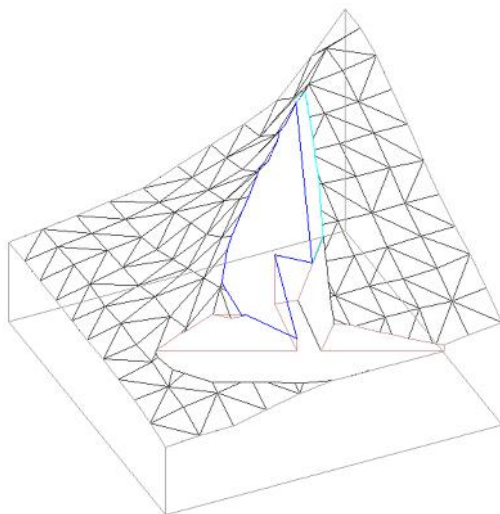


Fig. 11: Untergrund nach Abgleiten des Bruchkörpers von Bild 11



Fig. 12: Bruchkörper von Bild 10

10. Bestimmung des Sicherheitsfaktors für das bei Punkt 7 gewählte Wertepaar von Reibungswinkel und Kohäsion.  
Fragen: Warum besteht praktisch kein Unterschied in den Resultaten zu Punkt 7? Welche anderen Bruchmechanismen kämen in Frage (siehe Punkt 9)?
11. Bestimmung der kinematisch möglichen Bruchkörper für den in Punkt 9 und 10 erkannten anderen Bruchmechanismus (=> Ablöseflächen einführen).  
Fragen: Bei welchem Punkt bzw. bei welchen Koordinaten ist die Referenz-Ablösefläche einzufügen? Ist dieser Punkt wichtig?  
Gemäss 10 sind die Bruchkörper oberhalb der Einschnürungsstelle nicht von Interesse. Wie könnten diese von der Bestimmung ausgeschlossen werden? Hinweis: Einfluss der Klufffläche? Warum wird ohne Klufffläche kein Bruchkörper oberhalb der Einschnürung gefunden? Auf welchen Bereich können die Ablöseflächen beschränkt werden?  
Wie viele Bruchkörper gleiten auf der unteren, wie viele auf der oberen Schichtfläche ab?

Bei der Bestimmung der Bruchkörper in Punkt 9 wurden zwei Trennflächenscharen vorgegeben, eine Schar von Schichtflächen und die feste Klufffläche. Ein Bruch bei der Einschnürung gemäss Fig. 12 dürfte aber ungefähr parallel zur hinteren Steinbruchwand erfolgen, wobei dort nicht Gleiten massgebend sein wird, sondern Ablösen, d.h. ein Zugbruch. Zur Untersuchung dieses Bruchmechanismus wird im Menu *Kinematical Conditions / Block Shape* eine neue Trennflächenschar eingeführt, deren Orientierung (210° / 90°) der hinteren Steinbruchwand entspricht und als Ablösefläche (Tension Crack) wirkt (Fig. 13). Ihr Einfügepunkt liege mit x, y, z 143, 123, 130 in der oberen, westlichen Ecke des Steinbruchs.

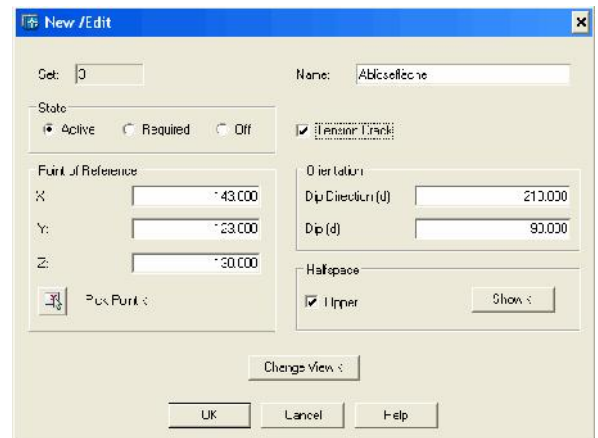


Fig. 13: Eingabe der Ablösefläche

Analog Fig. 6 kann mit dem Menu *Kinematical Conditions / Block Size* eine Schar von Ablöseflächen mit einem Abstand von z.B. 10 m definiert werden.

Nach der Berechnung der potentiellen Bruchkörper mit *Examination* (Fig. 1b) kann in *Results* der *State* von nicht interessierenden Bruchkörpern (z. B. Körper < 1'000 m<sup>3</sup>) *Off* gesetzt werden, damit sie in den folgenden Berechnungen gar nicht mehr berücksichtigt werden.

12. Definition der Festigkeitsparameter für die Ablösefläche.  
Frage: Warum können für die Ablösefläche keine Werte spezifiziert werden?
13. Berechnung der Sicherheitsfaktoren für die gefundenen Bruchkörper.  
Fragen: Welcher Bruchkörper wird am ehesten abgleiten (untere/obere Gleitfläche, kleine/grosse Körper)? Vergleich mit ursprünglichem Zustand vor dem Aushub des Steinbruchs: Warum konnten diese Bruchkörper früher nicht abgleiten?
14. Erläuterung anhand von Skizzen: Wie hätte der Felsabtrag im Steinbruch erfolgen müssen, um ein Versagen der Böschung zu verhindern?

## 5 Tipps und Workarounds

### Problem mit AutoCAD im Studenten Environment an der ETH

Vor Ausführen von AutoBlock sollen via Startmenu, konkret

*Start > All Programs > 02 Finite-Elemente > AutoBlock*

die beiden folgenden Optionen ausgeführt (und das erscheinende Fenster wieder geschlossen) werden:

- *01 PreConfig Autoblock*
- *02 Config Autoblock*

### Unzulässiges Abspeichern auf Desktop an der ETH

Wird wie im Abschnitt 3 empfohlen *EmptyProject.abl* auf den Desktop kopiert und AutoBlock durch Doppelklick darauf gestartet funktioniert alles einwandfrei. Wird aber (gilt nur für das ETH PC-Environment für Studenten am Höggerberg) AutoBlock via Menu gestartet und dort ein neues File kreiert, kann es nicht auf dem Desktop gespeichert werden (an einem anderen Ort aber schon).

### Ausführen von AutoBlock

Wie im Abschnitt 3.4 empfohlen wird AutoBlock am einfachsten gestartet mittels Doppelklick auf *EmptyProject.abl* (oder eine andere .abl Datei).

Des weiteren wird empfohlen den Bildschirmlayout in AutoBlock anzupassen durch Wahl des Menus

*AutoBlock > Preferences > Layout > Number of Viewports: 4 > Apply*

### Vermeidung der Fehlermeldung "Mangelndes RAM"

Parallel zu AutoCAD/AutoBlock sollten keine grösseren, d.h. viel RAM-Memory beanspruchende, andere Programme gestartet und laufen gelassen werden (z.B. MS- Word).

Um Datenverluste bei RAM-Problemen zu vermeiden wird empfohlen vor der Ausführung der Option *Examination* das Projekt abzuspeichern.

## 6 Abzugebende Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten gemäss Kapitel 4 sind stichwortartig zu dokumentieren und die Ergebnisse zu kommentieren. Von wichtigen Schritten (Dialogboxen mit Eingabedaten, Resultate usw.) sind Screenshots der aktuellen Windows (mit Alt-PrintScreen) zu machen und diese mit Paste (bzw. Ctrl-v) in den Text zu integrieren. Für das zentrale Element 2 können Fünfergruppen gebildet werden, d.h. pro Gruppe ist nur eine schriftliche Fassung abzugeben.