Beiträge zur Hydrogeologie / 54 / Seiten 79–96 / Graz 2003

Ein dreidimensionales hydrogeologisches Modell des Sonnwendstein/Semmering (Österreich)

A Three-Dimensional Hydrogeological Model of Sonnwendstein/Semmering (Austria)

S. Reinsdorff[1])

Inhalt

Seite

1. Einleitung 79
2. Lage, Geologie und Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes 80
3. Methodenüberblick 80
4. Modellerstellung 83
   4.1. Softwareauswahl 83
   4.2. Aufbau eines initialen Drahtmodells 84
   4.3. Plausibilitätskontrolle 84
   4.4. Modellierung der Modellgrenzen 86
   4.5. Konstruktion der Homogenbereichsgrenzen 86
   4.6. Zusammenfassen der Teilflächen und Übergang zur Randdarstellung 88
   4.7. Übergang von der Randdarstellung in ein Tetraedernetz 90
5. Modellauswertung 91
   5.1. Modellschnitte 91
   5.2. Volumenberechnungen 91
   5.3. Datenexport 91
6. Ergebnis 93
7. Diskussion 93

Zusammenfassung 94

Literatur 94

Summary 95

1. Einleitung

Vorbedingung für jede Grundwassermodellierung ist eine gute Kenntnis des geologisch-hydrogeologischen Aufbaus des Untergrundes. Im Gebiet des Sonnwendsteins

[1]) Mag. Stefan Reinsdorff, bf:gh, Büro für Geologie und Hydrogeologie, Wiesenbergstraße 10, A-5164 Seeham, Österreich. E-Mail: sreinsdorff@bfgh.at

(Semmering, Niederösterreich) wurden bei Detailkartierungen sehr komplexe geologische Strukturen angetroffen. Es zeigte sich, dass die klassischen Dokumentationsverfahren (Karte und Profilschnitte) nicht mehr ausreichend waren, um Form und Lage hydrogeologischer Homogenbereiche mit der für eine Kluftwassermodellierung erforderlichen Genauigkeit zu beschreiben. Aus diesem Grund wurden Methoden der computergestützten geologischen 3D-Modellierung eingesetzt, wie sie bereits seit Jahren im Bergbau und in der Erdölindustrie verwendet werden. Im Gegensatz zu den genannten Anwendungen mit klarer Trennung zwischen der Modellierung der Geometrie und der Eigenschaften mussten hydrologische Homogenbereiche modelliert werden, die durch Lithologie, Gefüge und hydraulische Eigenschaften definiert sind.

Die dazu notwendige Vorgehensweise wird im Folgenden vorgestellt. Die aus dem Modell abgeleiteten Erkenntnisse werden in Hinblick auf die Relevanz für das Forschungsprojekt „Erfassung von Fließprozessen zur hydrogeologischen Bewertung von klüftigen Festgesteinen" diskutiert (T. Harum et al., 2000, 2001, P. Reichl et al., 2002), das 2001 am Institut für Hydrogeologie und Geothermie der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH (Graz) abgeschlossen wurde.

2. Lage, Geologie und Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt südlich des Semmeringscheitels und umfasst mit dem Sonnwendstein und dem Hirschenkogel eine Fläche von etwa 9 km^2. Die großräumige Lage ist in Fig. 1 dargestellt. Figur 2 zeigt die Topographie, die Ausdehnung sowie den Verlauf des im Bau befindlichen Scheiteltunnels der S6-Semmering Schnellstraße.

Geologisch gehört das Gebiet zum Semmeringmesozoikum (Unterostalpin) mit einer Abfolge von Quarziten, Rauhwacken, Kalken und Dolomiten. Auf Basis der geologischen Karte (G. Riedmüller, 1987) und ergänzenden Detailkartierungen wurde ein geologisches Konzeptmodell entwickelt und daraus zahlreiche Geländeschnitte angefertigt.

Das Gebiet ist durch unterschiedlich hydrogeologisch wirksame Bereiche charakterisiert, wobei das Trennfugensystem das Netzwerk für die Grundwasserbewegung bildet. Zu seiner Erfassung wurden alle für die Wasserwegigkeit relevanten Trennfugeneigenschaften im Gelände erhoben (G. Winkler et al., 2003, G. Winkler, 2003).

Mittels Clustering erfolgte die Bewertung der Wasserwegigkeit im Kluftsystem. Die Untergliederung des Untergrundes in drei hydrogeologische Homogenbereiche (Wirksamkeitsklassen) resultiert schließlich aus der Kombination aus Geologie, Tektonik und den Ergebnissen der Clusteranalyse (G. Winkler et al., 2003, G. Winkler, 2003).

Auf Basis dieser Auswertung konnten eine hydrogeologische Homogenbereichskarte und 11 Geländeschnitte angefertigt werden.

3. Methodenüberblick

Ein digitales geologisches 3D-Modell umfasst eine Repräsentation der Geometrie geologischer Objekte sowie der räumlichen Verteilung ihrer Merkmale (R. Prissang, 1993, 1999). Es resultiert aus der geologischen Interpretation und aus geostatistischen Vorhersagen der Eigenschaften in zumeist unzugänglichen geologischen Bereichen und ist daher auf reduziertem Informationsgehalt aufgebaut (S. Houlding, 1994).

Fig. 1: Übersichtskarte.
General map.

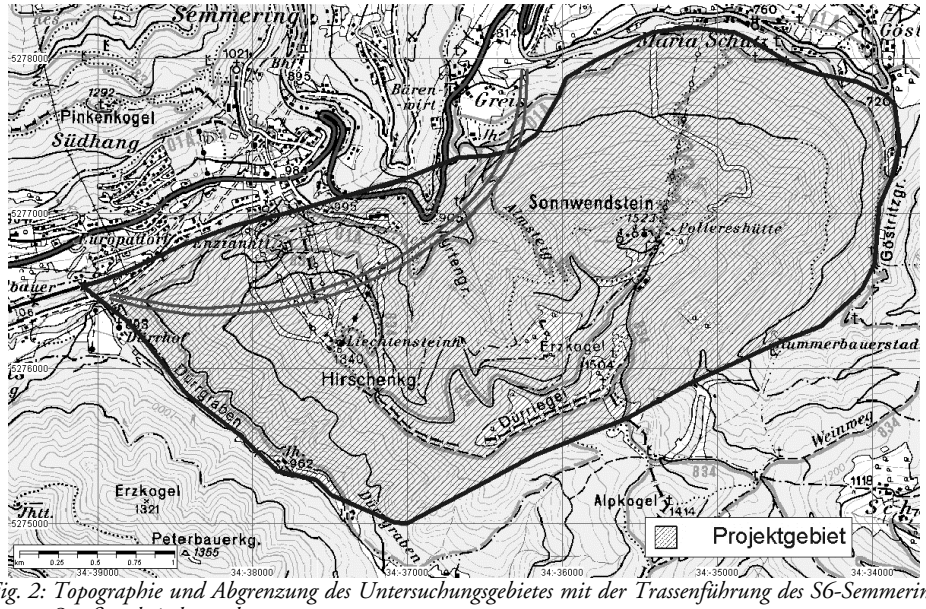

Fig. 2: Topographie und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes mit der Trassenführung des S6-Semmering Straßenscheiteltunnels.
Topography and boundary of the study area including the alignment of the road tunnel S6-Semmering.

Die zur Zeit am Markt erhältliche Software zur 3D-Modellierung verwendet grundsätzlich Techniken des Computer-Aided Designs (CAD). Die darin dem Benutzer gebotenen Werkzeuge werden immer besser an die speziellen Fragestellungen in der Geologie angepasst. Methoden aus dem GIS-Bereich spielen eine untergeordnete Rolle, da hier der Fokus auf der Unterstützung des Konstruktionsvorgangs liegt. Im Bereich der 3D-Modellierung existiert keine Universalmethode, die in jedem Fall einsetzbar wäre. Die Auswahl eines geeigneten Ansatzes ist stark von der jeweils zu bearbeitenden Problemstellung abhängig. Im Folgenden werden die wichtigsten, in der Geologie angewandten Methoden kurz vorgestellt (R. Prissang, 1993, 1999).

Am Anfang steht die sog. **Drahtmodellierung.** Sie erlaubt es, Flächen oder Körper durch Linienzüge (Kanten) und Punkte (Vertices) zu repräsentieren. Da dieser Ansatz der Arbeit mit Bleistift und Papier nahe kommt, wird er von vielen Systemen zur Dateneingabe und Objektmanipulation in der graphischen Benutzerschnittstelle benutzt. Vielfach eingesetzt werden Systeme, die auf der Verwendung sog. Strings basieren, d.h. geordneter Folgen räumlich definierter Punkte, die mit Attributen belegt werden können. Drahtmodelle enthalten jedoch nicht genügend topologische Information, um Flächen oder Körper eindeutig rechnerintern zu beschreiben. Deshalb wurden für diese Objektklassen spezielle Repräsentationsschemata entwickelt.

Generell werden bei der **Flächenmodellierung** vektor- und rasterbasierende Methoden unterschieden, wobei bei den ersteren jene Systeme eine Bedeutung erlangt haben, die auf der Verwendung sog. irregulärer Dreiecksnetze (Triangulated Irregular Networks, TINs) basieren. Solche Flächenmodelle können aus einer Menge von Strings aufgebaut werden, indem benachbarte Punkte finite Dreiecksflächen aufspannen, die zu einem Maschennetz verknüpft sind (Fig. 3, oben). Durch Festlegung von Bruchkanten kann die Triangulation nach Vorgaben des Anwenders beeinflusst werden. Ferner lassen sich Flächen miteinander vereinigen oder verschneiden. Als zweite Methode beruhen Raster- oder Gridmodelle auf einer Diskretisierung der Fläche in Quadrate oder Rechtecke gleicher Größe. Diese Methode findet vor allem in der Geländemodellierung

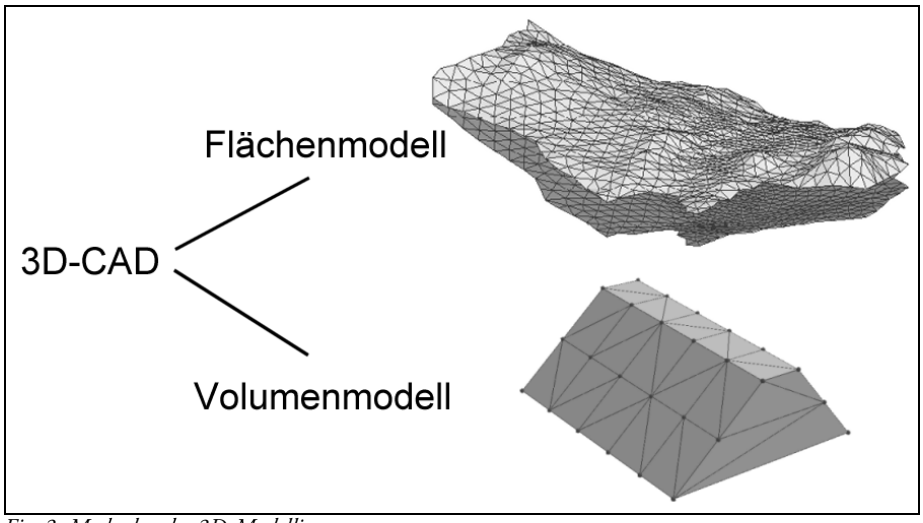

Fig. 3: Methoden der 3D-Modellierung.
Methods of 3D modeling.

ihre Anwendung, spielt aber, wegen ihrer immanenten geometrischen Ungenauigkeit, heute eine untergeordnete Bedeutung in der Konstruktion geologischer Flächen.

An dieser Stelle muss auch kurz auf den Begriff des digitalen Höhenmodells (DHM) eingegangen werden. Dabei handelt es sich um die Vereinfachung eines Flächenmodells durch die Einschränkung, dass jedem Punkt der Fläche genau eine Höhe (z-Wert) zugewiesen wird. Für den Einsatz in GIS-Systemen oder Oberflächenmodellierungspaketen ist diese Vereinfachung hinreichend. Ihr Beschreibungsumfang lässt jedoch, wie am Rastermodell ersichtlich, keine Modellierung überkippter Flächen zu.

Aus dem Bereich der **Volumenmodellierung** (siehe R. W. GOEBL, 1992, H. SAMET, 1990) werden hier nur drei Methoden angeführt: Die so genannte Randdarstellung (Boundary Representation) beschreibt Körper über ihre Außenhaut, d.h. Flächen (Facetten), Kanten und Vertices. Der geometrische Körper wird z.B. durch ein Netz von benachbarten Dreiecken aufgebaut (Fig. 3, unten). Die gespeicherte Topologie stellt sicher, dass die Facetten weder Lücken noch Überlappungen aufweisen.

Enumerationsverfahren (Spatial Enumeration) hingegen beruhen auf der Zerlegung von Körpern in gleichförmige Raumzellen gleicher oder unterschiedlicher Größe. Der bekannteste Vertreter dieses Repräsentationsschemas ist der 3D-Raster. Die Raumzellen werden als Voxel (volume-pixel) bezeichnet. Enumerationsverfahren werden heute hauptsächlich zur Beschreibung der räumlichen Verteilung von kontinuierlichen Merkmalen innerhalb geologischer Objekte eingesetzt. Zur Schätzung der Attributwerte aus verteilten Messpunkten steht eine Fülle geostatistischer Verfahren zur Verfügung.

Der flexibelste Ansatz zur Geometriemodellierung ist die Zellenzerlegung (Cell Decomposition), bei der ein Körper durch Zellen unterschiedlicher Form beschrieben werden kann.

4. Modellerstellung

4.1. Softwareauswahl

Für die Realisierung eines dreidimensionalen Homogenbereichmodells stehen grundsätzlich verschiedene Ansätze zur Auswahl. Zur Lösung der vorliegenden Fragestellung erwiesen sich unter Berücksichtigung der Art der Eingangsinformation (Geländeschnitte, hydrogeologische Karte) jedoch nur Methoden der Flächenmodellierung als zielführend. Erst nach der Fertigstellung des Modells können Methoden aus der Volumenmodellierung zur Anwendung kommen.

Für den Aufbau des 3D-Modells des Sonnwendsteins musste ein Ansatz gewählt werden, der auch die Beschreibung überkippter Flächen zulässt. Damit schieden alle DHM-basierten Modellierungspakete aus. Diese Anforderung wird von der Computersoftware GOCAD (Version 2.0.2) der Firma Earth Decision Sciences S.A. (vormals T-Surf) erfüllt, die anfänglich zur Lösung von Problemen in der Erdölgeologie erstellt wurde. Ihr Beschreibungsumfang umfasst sowohl Flächen- als auch Volumenmodelle. Ein Überblick über die darin gebotenen Methoden kann J.-L. MALLET (2002) entnommen werden.

Die Arbeit mit GOCAD lässt sich in zwei Teilschritte gliedern: Zuerst wird ein Modell in Randdarstellung in Form triangulierter Homogenbereichsgrenzflächen erstellt. Aus diesen wird schließlich durch Zellenzerlegung ein Volumenmodell aus finiten Tetraederelementen aufgebaut.

4.2. Aufbau eines initialen Drahtmodells

Bei der geometrischen Modellierung bildeten digitalisierte Linienzüge der hydrogeologischen Homogenbereichskarte, acht Längs- und drei Querprofile, sowie ein digitales Höhenmodell (DHM 25 × 25 m) die Basis für die Erstellung der Grenzflächen der Homogenbereiche (T. Harum et al., 2001). Über den vektoriellen Zusammenhang mit der Profillinie (d.h. der Lage der Profile im Grundriss) konnten die Geländeschnitte von 2D- in 3D-Drahtmodelle konvertiert werden. Die Homogenbereichskarte wurde durch Projektion der Grenzlinien auf das zuvor in ein TIN umgewandelte Raster-DHM 3D-konvertiert. Die Basisfläche des Modells wurde auf 700 mü.A. festgelegt – es resultierte daraus ein maximaler Höhenunterschied von 820 m.

Figur 4 zeigt die hydrogeologische Homogenbereichskarte mit der Lage der 11 Geländeschnitte (P1–P11). Als Beispiel werden die beiden Schnitte P3 und P6 in Fig. 5 und Fig. 6 angeführt. Karte und Profile sind hier noch als 2D-Drahtmodelle zu verstehen.

Erst nach Durchführung der 2D-3D-Konvertierung kann mit der eigentlichen Flächenmodellierung begonnen werden (A. Cheng, 1999a, 1999b, GOCAD 2.0.2, 2001). Figur 7 zeigt einen Blick auf das Untersuchungsgebiet aus der Vogelperspektive in Richtung Norden. Dargestellt sind die dreidimensionale Homogenbereichskarte und sämtliche Profile.

4.3. Plausibilitätskontrolle

Mit der 3D-Ansicht ist es möglich eine Plausibilitätskontrolle des Eingangsdatensatzes, insbesondere der Schnittpunkte zwischen Quer- und Längsprofilen sowie der Homogenbereichskarte, durchzuführen und, wenn notwendig, Inkonsistenzen zu korrigieren.

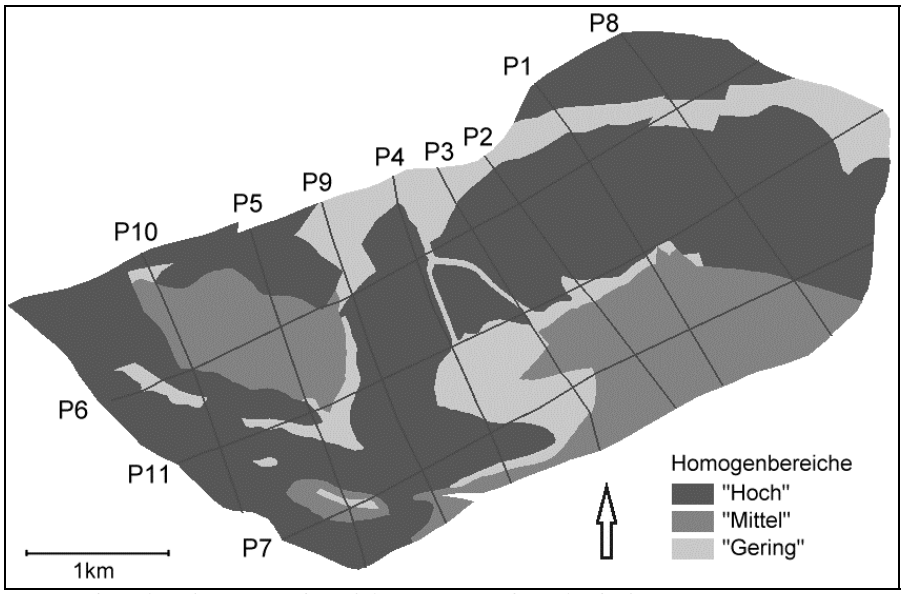

Fig.4: Hydrogeologische Homogenbereichskarte mit Lage der Geländeschnitte (P1–P11).
Map of hydrogeological units containing position of cross-sections (P1–P11).

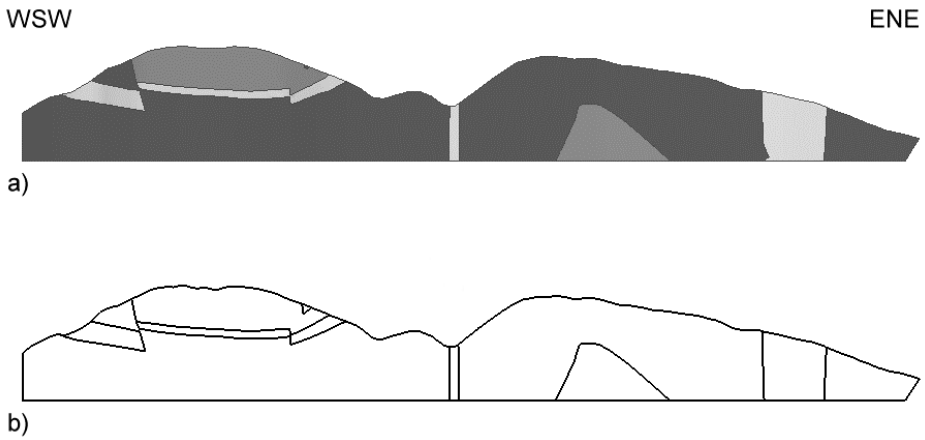

Fig. 5: Längsprofil P6. a) – mit Ausweisung der hydrogeologischen Homogenbereiche, Legende siehe Fig. 4; b) – digitalisierte Linienzüge.
Longitudinal cross-section P6. a) – hydrogeological units, legend see fig. 4; b) – digitized lines.

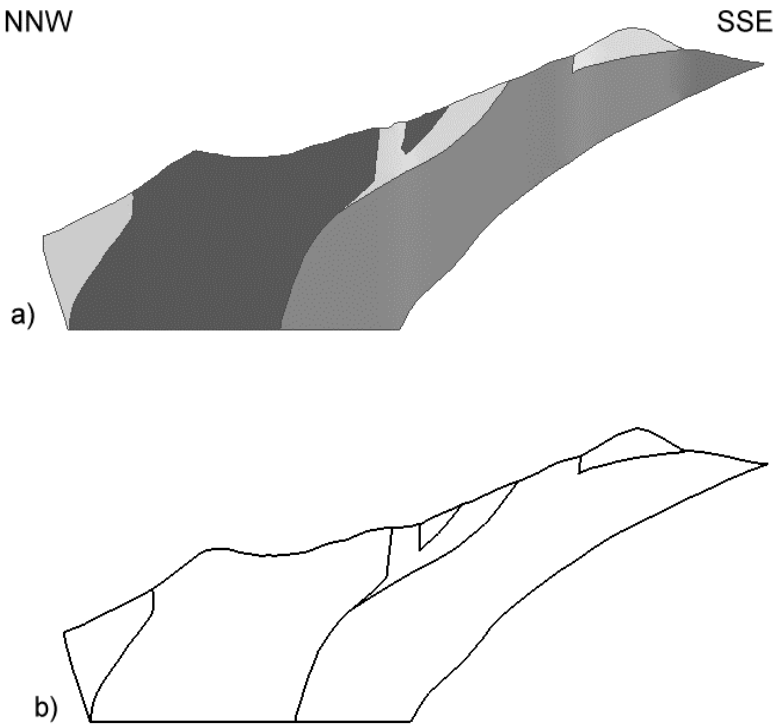

Fig. 6: Querprofil P3. a) – mit Ausweisung der hydrogeologischen Homogenbereiche, Legende siehe Fig. 4; b) – digitalisierte Linienzüge.
Transversal cross-section P3. a) – hydrogeological units, legend see fig. 4; b) – digitized outlines.

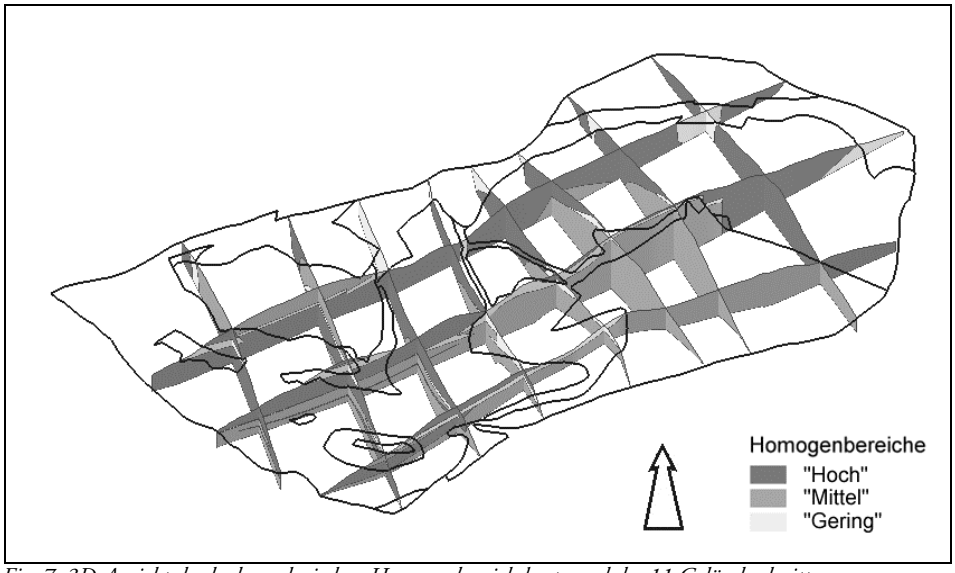

Fig. 7: 3D-Ansicht der hydrogeologischen Homogenbereichskarte und der 11 Geländeschnitte.
3D view showing the map of hydrogeological units and eleven cross-sections.

4.4. Modellierung der Modellgrenzen

Das digitale Höhenmodell mit der Rasterweite von 25 × 25 m lieferte die Daten für die Generierung der Oberfläche. Die geordneten Rastermittelpunkte wurden dabei direkt trianguliert, d.h. dass benachbarte Punkte (finite) Dreiecksflächen bilden. Das daraus resultierende Dreiecksnetz zeichnet die Morphologie der Oberfläche nach.

Die Konstruktion der horizontalen Modellbasisfläche erfolgte über die Struktur der Oberfläche, wobei hier lediglich die Höhe der Dreiecksknotenpunkte auf konstant 700 mü.A. eingestellt wurde.

Aus den Rändern der Oberfläche und der Modellbasisfläche wurde die seitliche Begrenzungsfläche modelliert. Durch die Verwendung der Randpunkte von Ober- und Basisfläche bei der Konstruktion der seitlichen Begrenzungsfläche wurde gewährleistet, dass beim abschließenden Zusammenfügen aller drei Modellbegrenzungsflächen ein „geschlossenes" System entstand (siehe Kap. 4.5.).

4.5. Konstruktion der Homogenbereichsgrenzen

Rotiert man die 3D-Ansicht in Fig. 7 interaktiv, wird klar, welche Linienzugabschnitte der einzelnen Profile und der Karte Grenzflächen zwischen den Homogenbereichen aufspannen. Aus diesen Abschnitten müssen die Flächen konstruiert werden. Figur 8 zeigt am Beispiel des Homogenbereiches „hoch wirksam", wie die Konstruktion der Begrenzungsfläche aus der zur Verfügung stehenden Linieninformation durchgeführt wurde.

Die Konstruktion solch komplizierter Strukturen erfolgte über eine Aufteilung in zahlreiche Teilflächen, die erst nach ihrer Vereinigung die dargestellte Gesamtfläche ergaben. Diese kann bei Bedarf unter Anwendung einer speziellen Interpolationsmethode, der DSI, Discrete Smooth Interpolation (J.-L. MALLET, 1989), geglättet werden,

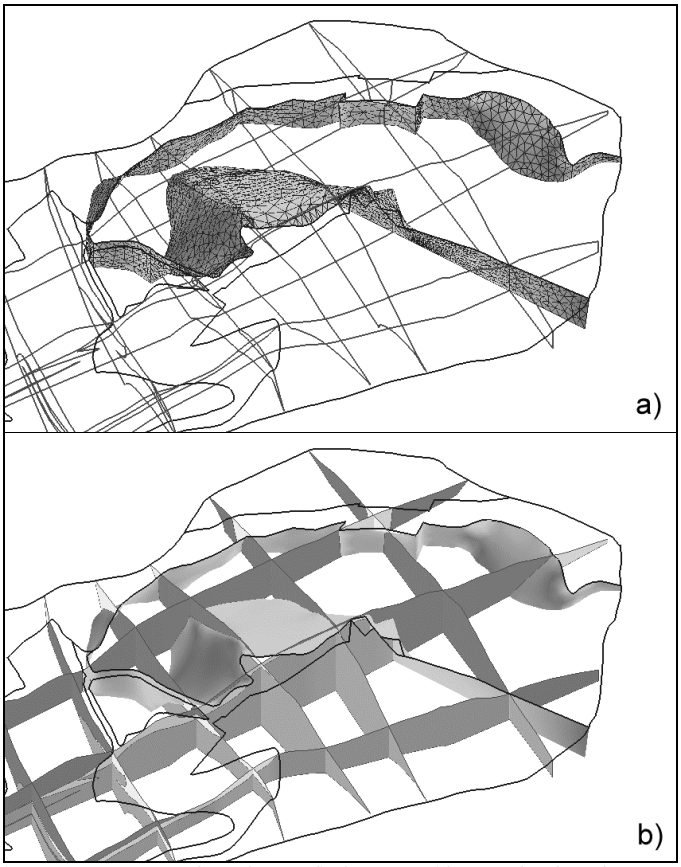

Fig. 8: Konstruktion einer Homogenbereichsgrenzfläche. Im Bild a) sind neben der triangulierten Fläche nur die Linienzüge von Karte und Profilen dargestellt. Im Bild b) umschließt diese Fläche einen dunkelgrauen Bereich, den Homogenbereich „hoch wirksam".
Construction of a boundary surface between two hydrogeological units. Figure a) shows a triangulated surface and the digitized lines of map and cross-sections. Figure b): the dark-gray region in the cross-sections, the hydrogeological unit "high", is enclosed by the surface.

wobei jedoch darauf zu achten ist, dass im Bereich der Linienzüge die Vertices fixiert bleiben.

Weil zur Auflösung kleinerer Strukturen die vorhandene Profildichte zu gering war, musste immer wieder Rücksprache mit dem Geologen gehalten werden, der das Konzeptmodell, die Karte und die Profile erarbeitet hatte. Bei der Konstruktion der Flächen konnten selbst Fehler im Konzeptmodell leicht erkannt und korrigiert werden. Durch dieses Feedback konnten zeit- und kostenintensive Korrekturen nach Fertigstellung des Modells vermieden werden.

Eines der wichtigsten Kriterien bei der Modellierung der Homogenbereiche unter Verwendung triangulierter Flächen ist die Art des Kontaktes zwischen einzelnen Teilflächen. Ein Homogenbereich muss in sich konsistent sein, d.h. es dürfen keine Fehler in der Dreiecksvermaschung vorhanden sein. Dies wären z.B. fehlende Dreiecke in der Fläche oder geringfügig unterschiedliche Flächen zwischen benachbarten Homogenbe-

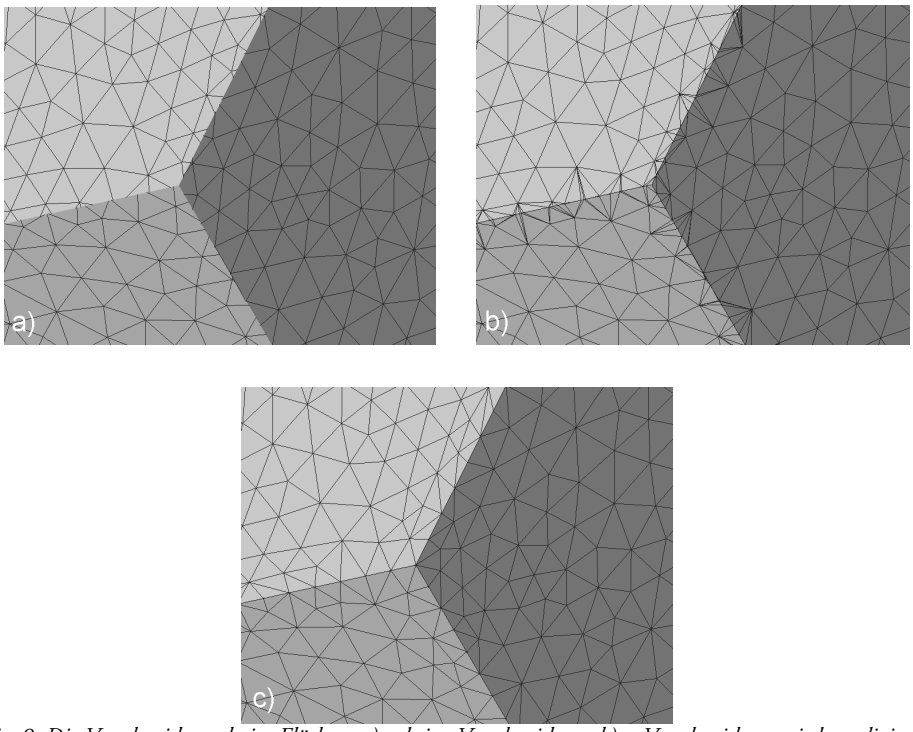

Fig. 9: Die Verschneidung dreier Flächen: a) – keine Verschneidung, b) – Verschneidung mit komplizierter Schnittlinie, c) – Verschneidung mit bereinigter Schnittlinie.
Intersection of three surfaces: a) – no intersection, b) – conjunction with complex section line, c) – conjunction with simplified section line.

reichen. Daher dürfen zwei Homogenbereiche nur durch eine gemeinsame Grenzfläche voneinander getrennt sein. Die Problematik soll anhand von Fig. 9 exemplarisch beschrieben werden.

Figur 9 zeigt drei Flächen, die zueinander senkrecht stehen. In Fig. 9a durchdringen sich die Flächen – an der Dreiecksvermaschung ist zu erkennen, dass sie physisch nicht miteinander verbunden sind. In Fig. 9b sind die Flächen bereits miteinander verschnitten. Erkennbar ist dies an den zahlreichen kleinen Dreiecken („Minielementen"), die sich im Bereich der Schnittlinien gebildet haben. Punkte auf der Schnittlinie liegen auf beiden Flächen; die drei Flächen haben einen exakt definierten Schnittpunkt.

Der Vorgang der Verschneidung wird von der Modellierungssoftware automatisch durchgeführt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Verschneidung mehrerer Flächen auf kleinstem Raum von der Numerik her problematisch ist, was zu einer Instabilität der benutzten Software führen kann. Aus diesem Grund wird die Schnittlinie vereinfacht, indem viele Minielemente zu wenigeren und größeren Dreiecken vereinigt werden. Das Ergebnis ist in Fig. 9c dargestellt.

4.6. Zusammenfassen der Teilflächen und Übergang zur Randdarstellung

Die Repräsentation von Körpern durch eine Menge von Teilflächen allein reicht nicht aus, um die Volumenermittlungen durchführen zu können. Die 19 Trennflächen (siehe

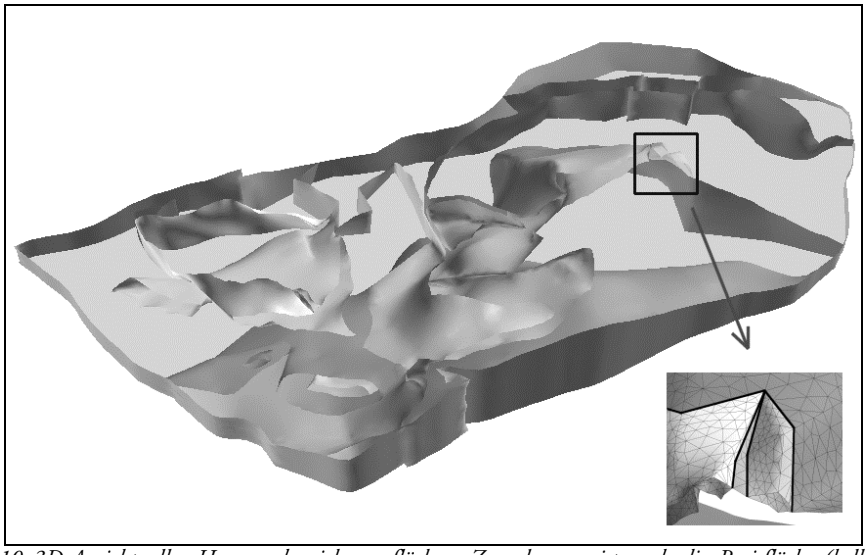

Fig. 10: 3D-Ansicht aller Homogenbereichgrenzflächen. Zu erkennen ist auch die Basisfläche (hellgrau) sowie die seitliche Modellbegrenzungsfläche. Das kleine Bild rechts unten zeigt in einer lagemäßig etwas veränderten Detailansicht einen Ausschnitt mit der Verschneidung mehrerer Teilflächen. Die Schnittlinien sind zur Verdeutlichung schwarz nachgezeichnet (vgl. Kap. 4.5.).
3D view of all boundary surfaces of the hydrogeological units. The base surface (light gray) and the lateral boundary surface are visible. In the inset, the section line between several surfaces is highlighted (see chap. 4.5.).

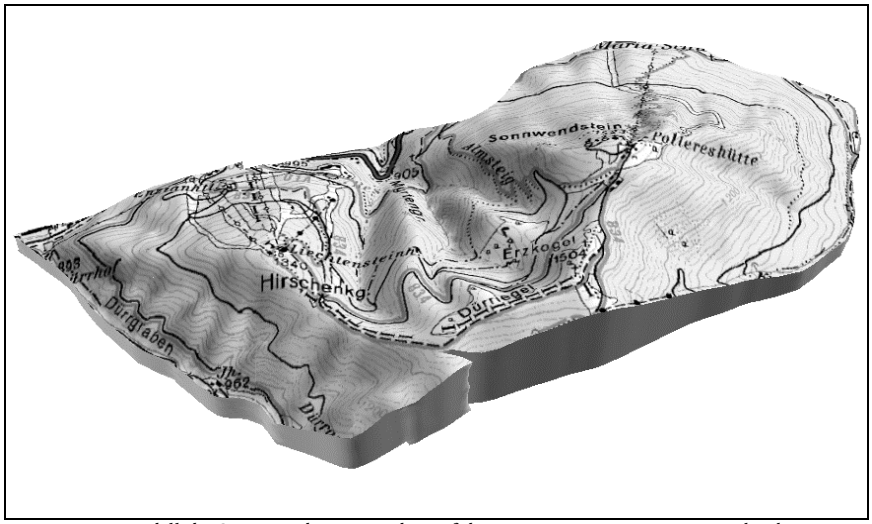

Fig. 11: Das 3D-Modell des Sonnwendstein mit der auf das DHM projizierten topographischen Karte.
3D model of Sonnwendstein Mountain. The topographic map is draped on the digital elevation model.

Fig. 10), die insgesamt die einzelnen Homogenbereiche bzw. deren Teilkörper beschreiben, müssen daher zu geschlossen Flächen zusammengefasst werden (Fig. 11). Die Modellierungssoftware übernimmt diese Aufgabe und generiert für jeden Bereich eine ge-

schlossene Fläche in Form eines Polyeders. Jede geschlossene Fläche ist topologisch zu einer Kugelfläche homöomorph. Anschaulich gesprochen entspricht sie einem Ball, aus dem weder Luft hinaus noch in diesen hinein gelangen kann. Die automatische Generierung funktioniert jedoch nur dann, wenn in der Dreiecksvermaschung keine Lücken oder Lageunstetigkeiten vorhanden sind. Solche Fehler können im Speziellen im Bereich von Flächenverschneidungen auftreten. GOCAD verfügt über Reparaturmechanismen, um solche Fehlstellen zu identifizieren und zu korrigieren.

4.7. Übergang von der Randdarstellung in ein Tetraedernetz

Um auch die Verteilung hydrogeologisch relevanter Eigenschaften im Inneren der einzelnen Körper modellmäßig erfassen zu können, werden die Modelle (siehe Fig. 12)

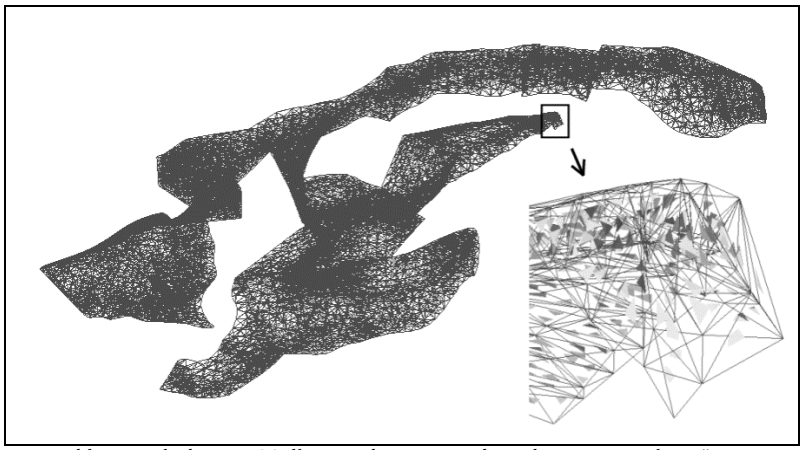

Fig. 12: Die geschlossene Fläche eines Teilkörpers des Homogenbereichs „gering wirksam".
The closed surface of a partition of the hydrogeological unit "low".

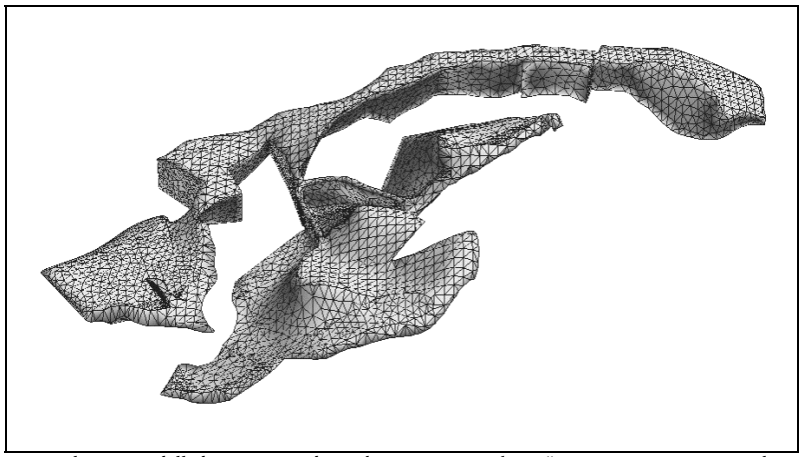

Fig. 13: Das Volumenmodell des Homogenbereiches „gering wirksam" aus Fig. 12. Im Detailausschnitt ist das Tetraedernetz zu erkennen.
Volume model of the hydrogeological unit "low", shown in fig. 12. The detailed view depicts the tetrahedron network.

in Randdarstellung mittels Zellenzerlegung in ein Netz aus Tetraederelementen überführt (Fig. 13). Die Tetraedereckpunkte können sodann mit den hydrogeologischen Attributen des entsprechenden Homogenbereiches verknüpft und Volumina berechnet werden. Der Aufbau eines Volumenmodells über Tetraederelemente gewährleistet die bestmögliche Anpassung an die triangulierten Homogenbereichsgrenzflächen. Die konstruktive Erfassung der Homogenbereiche durch ein Volumenmodell bildet den Abschluss der 3D-Geometriemodellierung.

5. Modellauswertung

5.1. Modellschnitte

Vom Volumenmodell können Schnitte in beliebiger Lage angefertigt werden, um Analysen des Untergrundes für interessierende Bereiche zu erleichtern (Fig. 14).

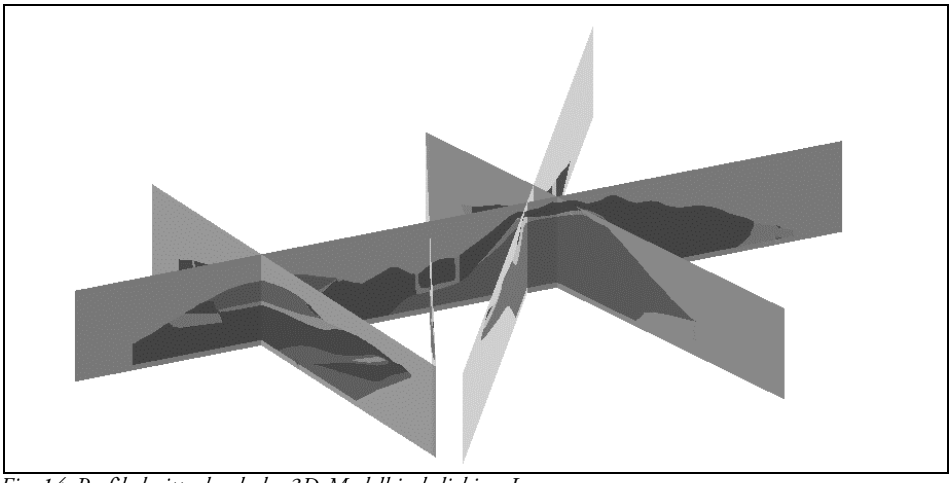

Fig. 14: Profilschnitte durch das 3D-Modell in beliebiger Lage.
Cross-sections through the 3D model in arbitrary orientation.

5.2. Volumenberechnungen

In Fig. 15 sind die drei hydrogeologischen Homogenbereiche (Wirksamkeitsklassen) „hoch“, „mittel“ und „gering“ zusammen mit der seitlichen Modellbegrenzungsfläche dargestellt. Aus dem Modell der Homogenbereiche, das sich aus einzelnen Teilkörpern zusammensetzt, ließen sich leicht die Volumina ermitteln. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst; danach nimmt der modellierte Gesamtbereich ein Volumen von ca. 3,3 km^3 ein.

5.3. Datenexport

Alle Objekte des 3D-Modells, das sind Punkte, Linienzüge, Flächen, Volumenmodell oder Modellschnitte, können in verschiedene Dateiformate, aber auch in einfach zu lesende ASCII-Dateien exportiert werden. Zusätzlich können vom Modell oder von

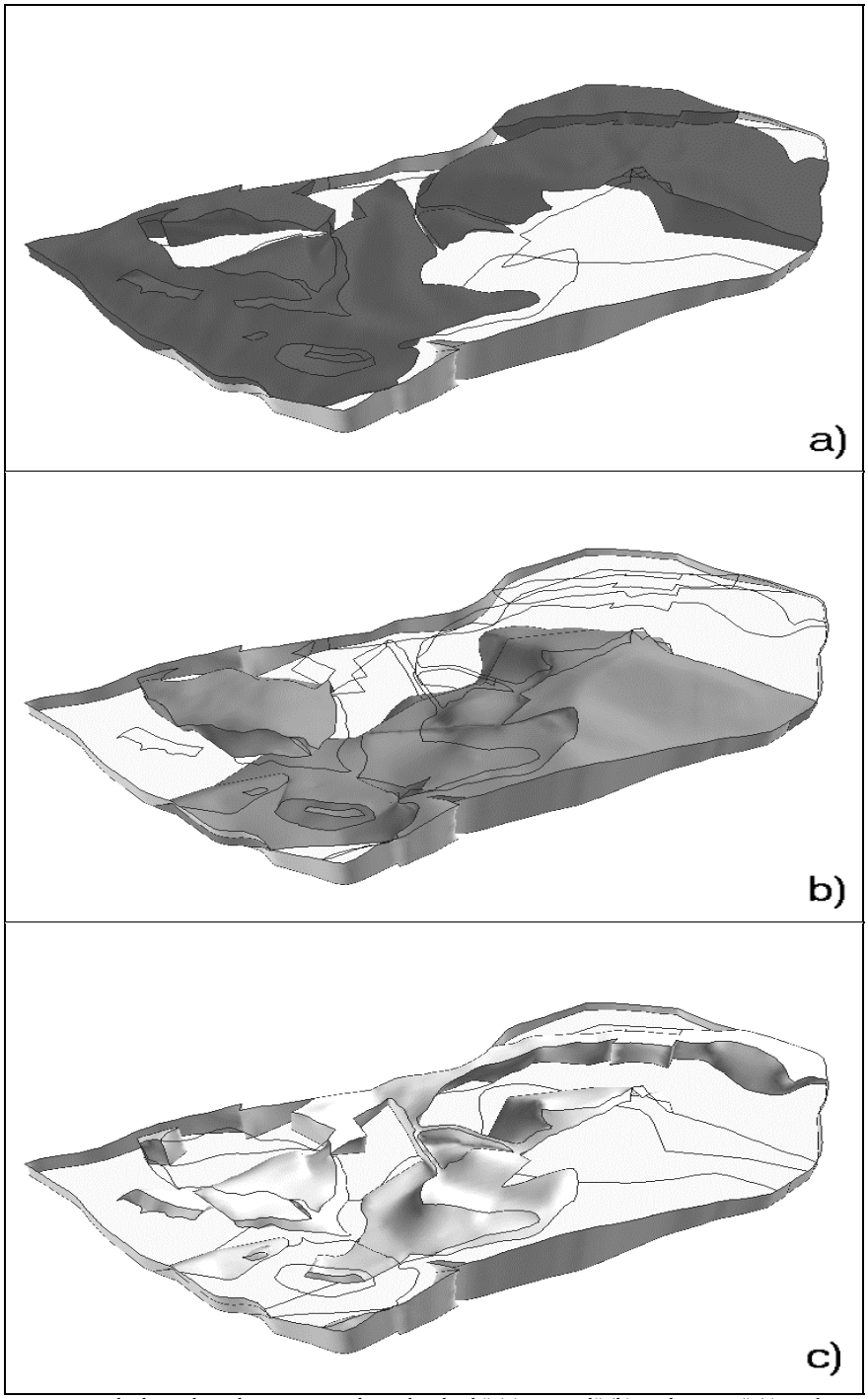

Fig. 15: Die hydrogeologischen Homogenbereiche „hoch" (a), „mittel" (b) und „gering" (c) wirksam.
The three hydrogeological units: "high" (a), "medium" (b) and "low" (c).

Tab. 1: Volumina der einzelnen hydrogeologischen Homogenbereiche und die Anzahl der Teilkörper. Volumes of hydrogeological units and number of disjoint bodies.

Homogenbereiche	Volumen [m^3]	Anzahl der Teilkörper
„hoch“	$1{,}60 \times 10^9$	4
„mittel“	$1{,}35 \times 10^9$	2
„gering“	$3{,}34 \times 10^8$	7
Gesamtvolumen	$3{,}29 \times 10^9$	

Teilen anschauliche Bilder oder Filme angefertigt werden. Der Export in eine sog. VRML-Datei (Virtual Reality Modeling Language) ermöglicht ein interaktives Betrachten mit jedem herkömmlichen Internetbrowser.

6. Ergebnis

Durch die 3D-Modellierung des Sonnwendsteins konnte die Erfassung der räumlichen Ausdehnung unterschiedlicher hydrogeologischer Homogenbereiche realisiert werden. Die daraus errechneten Homogenbereichsvolumina wurden in einer nachfolgenden hydraulischen Kluftwassermodellierung benötigt. Modellgeländeschnitte in beliebiger Lage oder die interaktive Betrachtung des Modells im Internetbrowser ermöglichen einen ausgezeichneten Analysezugang und erhöhen die Vorstellungskraft des Betrachters.

7. Diskussion

Die hydraulische Kluftwassermodellierung benötigt als Eingangsparameter Information über die Form, Lage und Volumina hydrogeologischer Homogenbereiche. Aufgrund der im Arbeitsgebiet vorliegenden komplexen Strukturen war der Einsatz von Methoden der computergestützten geologischen 3D-Modellierung notwendig.

Zu Beginn steht ein geologisches bzw. hydrogeologisches Konzeptmodell, das sich auf Kartierungen, eventuell verfügbare Bohraufschlüsse, die tektonische Genese usw. stützt. Die Qualität des späteren 3D-Modells hängt wesentlich vom Konzeptmodell ab, das in der Regel über eine hydrogeologische Karte und Geländeschnitte dokumentiert ist. Je dichter der Profilabstand ist, desto einfacher und genauer kann das Konzeptmodell in ein digitales Modell überführt werden. Die Gestaltung der Flächen im informationsleeren Raum zwischen den Geländeschnitten erfolgt nach geologisch plausiblen Gesichtspunkten. Eine der wichtigsten Forderungen ist die Modellkonsistenz. Diese ist für die einzelnen Flächen oder Körper beim Einsatz entsprechender Repräsentationsschemata (z.B. Randdarstellung, Zellenzerlegung) durch die Prüfung topologischer Kriterien immer gewährleistet. Des Weiteren ist eine Untersuchung der Nachbarschaftsverhältnisse der modellierten Objekte erforderlich, um undefinierte Hohlräume im Gesamtmodell auszuschließen.

Bei einfachen Strukturen innerhalb des Gebirgskörpers, wie z.B. gleichmäßiger Einfallsrichtung der hydrogeologischen Einheiten, kann das Volumen durch geometrische Überlegungen berechnet bzw. abgeschätzt werden. Sind die Strukturen aber durch tektonische Beeinflussung (Faltung, Störungen, Überschiebungen usw.) kompliziert,

kann ausschließlich die 3D-Modellierung helfen, den Gebirgskörper mit all seinen Strukturen räumlich zu erfassen und Volumenberechnungen vorzunehmen.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Problematik der 3D-Modellierung bei komplexen geologisch-hydrogeologischen Verhältnissen am Beispiel des Gebietes Sonnwendstein, südlich des Semmering (Österreich), diskutiert. Die räumliche Erfassung komplizierter geologischer oder hydrogeologischer Einheiten im Untergrund kann heute mit spezieller CAD-Software vorgenommen werden. Da es keine „Universalmethode" im Bereich der dreidimensionalen Modellierung gibt, müssen die angewandten Arbeitsmethoden systematisch auf die gegebenen Eingangsparameter und auf die konkrete Fragestellung abgestimmt werden.

Für das tektonisch stark beanspruchte Gebirge im Arbeitsgebiet hat sich das Softwarepaket GOCAD als geeignet erwiesen. Neben einer kurzen Einführung in die angewandten Verfahren wird die Modellierung von drei hydrogeologisch definierten Homogenbereichen eingehend beschrieben.

Das 3D-Modell erhöht durch die ausgezeichneten Visualisierungsmöglichkeiten das Vorstellungsvermögen des Betrachters und führt dadurch zu einem besseren räumlichen Verständnis. Es gilt daher auch als wichtige Entscheidungshilfe für unterschiedlichste Fragestellungen.

Die Kenntnis von Form, Lage und Volumina der hydrogeologischen Homogenbereiche ist eine wesentliche Voraussetzung für die hydraulische Modellierung. Diese Informationen wurden schließlich als Input an die Kluftwassermodellierungssoftware FRACMAN (Golder Associates) übergeben. Ohne Einsatz der 3D-Modellierung hätten die entsprechenden Informationen nur als grobe Schätzwerte Eingang in das Kluftwassermodell gefunden und damit die Güte des Modells und der daraus abgeleiteten Maßnahmen/Aussagen negativ beeinflusst.

Literatur

GOCAD (2001): GOCAD Computer-Software, Version 2.0.2.– Earth Decision Sciences, USA, Houston, Texas. http://www.ensg.u-nancy.fr/GOCAD/ und http://www.earthdecision.com/.

GOCAD (2001): GOCAD 2.0 User's Manual.– Draft Copy, ASGA, Nancy, France.

Cheng, A. (1999a): Basics in GOCAD I.– Preview Edition, T-Surf USA, Houston, Texas.

Cheng, A. (1999b): Horizon and Fault Modeling in GOCAD.– Vol. **1**, T-Surf USA, Houston, Texas.

Goebl, R. W. (1992): Computer Aided Design.– 302 S., Mannheim/Wien/Zürich (B.I.-Wissenschaftsverlag).

Harum, T., H. Kupfersberger, W. Poltnig, P. Reichl, S. Reinsdorff, G. Rock, Ch. Ruch, E. Strobl, G. Winkler, R. Fruhwirth, A. Maier, R. Morawetz, R. Rieger, J. Schön, K. Fuchs, J. Hofrichter & U. Kleb (2000): „EROS" – Erfassung von Fließprozessen zur hydrogeologischen Bewertung von klüftigen Festgesteinen, TSP, Tätigkeitsbericht über Forschungsarbeiten.– Unveröff. Bericht, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH, 202 S., Graz.

Harum, T., H. Kupfersberger, W. Poltnig, P. Reichl, S. Reinsdorff, Ch. Ruch, E. Strobl, G. Winkler, J. Schön, J. Hofrichter & U. Kleb (2001): Erfassung von Fließprozessen zur hydrogeologischen Bewertung von klüftigen Festgesteinen, Endbericht über Forschungsarbei-

ten 2001.– Unveröff. Bericht, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH, 124 S., Graz.
Houlding, S. (1994): 3D Geoscience Modeling; Computer Techniques for Geological Characterisation.– 309 S., Berlin/Heidelberg/New York (Springer Verlag).
Mallet, J.-L. (1989): Discrete smooth interpolation.– ACM Trans. on Graphics, **8**, **2**, 121–144.
Mallet, J.-L. (2002): Geomodeling.– 612 S., Oxford (Oxford University Press).
Prissang, R. (1993): Modellierung schichtiger Lagerstätten. Eine kurze Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften.– Vorlesungsskriptum, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, Freie Universität Berlin.
Prissang, R. (1999): Einführung in die digitale Lagerstättenmodellierung. Eine kurze Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften.– Vorlesungsskriptum, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, Freie Universität Berlin.
Reichl, P., E. Strobl & G. Winkler (2002): Hydrogeologische Systembeschreibung. Eine Grundlage für die Bewertung umweltrelevanter Auswirkungen von Untertagebauwerken.– Felsbau, Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, Bd. **5**, 112–120, Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Verlag Glückauf GmbH).
Riedmüller, G. (1987): Geologischer Übersichtslageplan M 1 : 5000, Semmeringtunnel Variantenstudium.– Institut für technische Geologie und angewandte Mineralogie, Technische Universität Graz.
Samet, H. (1990): The Design and Analysis of Spatial Data Structures.– 493 S., Reading, MA/Menlo Park, CA u.a. (Addison-Wesley).
Winkler, G., P. Reichl & E. Strobl (2003): Hydrogeological conceptual model – fracture network analyses to determine hydrogeological homogeneous units in hard rocks.– RMZ – Material and Geoenvironment, Groundwater in Geological Engineering, Vol. **50**, No.**1**, 417–421, Ljubljana.
Winkler, G. (2003): Fracture network analyses for hydraulic modeling approaches of fractured aquifers.– Ph.D. Thesis, 130 S., University of Technology Graz, Austria.

Summary

This paper describes the applied modeling methods and the development of a 3D-subsurface-model within the complex geological and hydrogeological environment of Sonnwendstein mountain south of Semmering pass (Austria). The set-up of digital models for geological or hydrogeological bodies is supported by specific geoscientific 3D CAD software packages. These systems employ different representation schemes to describe surfaces as well as bodies. As there is no general-purpose approach existing, users must carefully choose a method matching the concrete problem. In the presented study, the GOCAD package had been selected as it can tackle overturned folds. A detailed account of the activities to build a 3D model of hydrogeologic units is given.

The visualization tools, provided in GOCAD, enabled geologists to inspect the model and gain an in-depth understanding of the subsurface structures.

The final model shows the spatial extent of three hydrogeological units. Shape and location of the individual bodies as well as their volumes form vital input parameters to a groundwater flow model as in this case the software package FRACMAN (Golder Association). Without the implementation of a 3D model these essential input parameters could only derive from a rough approximation. This would reduce the quality of a groundwater model and would lead to negative influence in case of succeeding procedures and conclusions.

Schlüsselwörter: 3D-Modellierung, hydrogeologischer Homogenbereich, Flächenmodellierung, GOCAD, Semmering
Keywords: 3D modeling, hydrogeological units, surface modeling, GOCAD, Semmering