Agenten im Hallstätter Salzbergwerk. Agentenbasierte Simulation für den bronzezeitlichen Salzbergbau in Hallstatt/OÖ

Kerstin Kowarik[1], Hans Reschreiter[1], Gabriel Wurzer[2], Ralf Totschnig[1], Andreas Rausch[1]

[1] Prähistorische Abteilung, NHM Wien
[2] Institut für Architekturwissenschaften, TU Wien

Zusammenfassung

Das bestehende archäologische Modell zu Organisation und Funktionsweise des bronzezeitlichen Salzbergbaus in Hallstatt/OÖ lässt einige bedeutende Fragen offen: Wie groß waren die Abbaureviere? Wie lange dauerte die Betriebszeit der Abbauhallen? Was war das Produktionsvolumen? Wie groß war die Bergbaugemeinschaft? Somit fehlen wesentliche Informationen, um zentrale Aussagen zur wirtschafts- und sozialhistorischen Beurteilung dieses im prähistorischen Europa einzigartigen Platzes treffen zu können.

Durch agentenbasierte Modellierung (ABM) konnten wir das bestehende Erkenntnismodell in eine Simulation übersetzen. Dadurch war es erstmals möglich die geltenden Annahmen auf logische Konsistenz zu überprüfen sowie zur Ermittlung der angesprochenen Fragen zu benutzen. Wir sind der Meinung, dass wir hiermit ein geeignetes Werkzeug für die Analyse komplexer Arbeits- und Produktionsabläufe geschaffen haben.

Abstract

The existing archaeological model of the Bronze Age saltmines in Hallstatt (Upper Austria) leaves some important unanswered questions: What was the size of the mining area, how long did mining activities continue, what was the amount of salt mined, how big was the size of the mining community. This is regrettable, since answers to these questions would provide important insights into the economic and social history of prehistoric Europe.

By using agent-based modeling (ABM), we have translated the body of theories conceptualizing the mining complex into a simulation. This allowed to check the consistency of the existing archaeological knowledge and obtain answers to the aforementioned questions using computation. We are convinced that our solution can be taken as powerful tool for the analysis of complex production as well as for explorative computation of working processes.

1. Einleitung

Die aktuelle Theoriebildung zu Organisation und Funktionsweise des bronzezeitlichen Salzbergbaus im Hallstätter Salzberg ist durch große Detailfülle und Komplexität gekennzeichnet (Kap. 1.2). Dieser an sich erfreuliche Tatbestand erschwert das explorative Arbeiten mit dem Erklärungsmodell[1], d.h. „was wäre wenn"-Fragestellungen können nur schwer durchgespielt und in all ihren Auswirkungen abgeschätzt werden.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode vor, die ebendies ermöglicht. Mithilfe einer Agentenbasierten Simulation (ABM) wurde das verbale Erklärungsmodell in ein digitales Modell „umgesetzt" und somit ein Werkzeug geschaffen, das erlaubt, das archäologische Modell unter veränderbaren Parametern (Anzahl der ArbeiterInnen[2], Höhe der Abbauhalle, etc.) bei unveränderten Grundannahmen (straffe Organisation, hohe Arbeitsteiligkeit, etc.) immer wieder durchzuspielen und dessen Reaktionen zu analysieren.

Der Aufbau einer Simulation führt grundsätzlich zu einer systematischen Analyse des bestehenden verbalen Modells und legt Inkonsequenzen in der Argumentation sowie Datenlücken, u. a. durch die interdisziplinäre Diskussion, offen. Bei einem Erklärungsmodell entsprechender Komplexität und Detailfülle entwickeln sich automatisch implizite Annahmen, die oftmals nicht mehr in vollem Umfang hinterfragt und analysiert werden können. Der Aufbau einer Simulation zwang dazu, diese 1. „offen zu legen" und 2. rigoros zu hinterfragen.

- Durch den Aufbau einer Simulation aus dem uns vorliegenden Wissen über den bronzezeitlichen Bergbau im Salzberg von Hallstatt konnten wir ein in sich logisches und berechenbares Modell erstellen (Kap. 2). Dabei waren folgende Problemstellungen zu bewältigen:
  - Datenselektion: Die Menge der zur Verfügung stehenden Informationen musste auf jene beschränkt werden, welche unmittelbar relevant für die spätere Auswertung waren (Kap. 1.1 und 2.1.1).
  - Datenerhebung: Fehlende Informationen wurden in einem Zwischenschritt erhoben (Kap. 2.1.1).
- Hierdurch wurde es möglich, das Modell bei bestehenden Grundannahmen unter veränderbaren Parametern immer wieder durchzuspielen. Dies führte zum einen zur Korrektur bestimmter impliziter Annahmen innerhalb des archäologischen Modells: So konnte gezeigt werden, dass die vollständige Ausbeutung einer Abbauhalle nur einen Bruchteil der bisher angenommenen Zeit und Personenzahl benötigt. Zum anderen konnte die Argumentation des verbalen Modell auf seine innere Stringenz überprüft werden (Kap. 2.3 und 3).
- Die gewonnenen Erkenntnisse legen den Grundstein für eine Systemmodellierung des gesamten bronzezeitlichen Bergbaus in Hallstatt (Kap. 3).
- Es wurde ein Werkzeug geschaffen, das exploratives Experimentieren mit Modellen prähistorischer Produktionsabläufe ermöglicht (chaîne operatoire) (Kap. 3).

1.1 Agentenbasierte Simulation in der Archäologie

ABM zählt zu den computergestützten Modellierungstechniken, die in der anthropologischen und archäologischen Forschung seit mehr als einem Jahrzehnt eingesetzt werden (Altaweel 2006: 30-31).

Die Agentenbasierte Simulation nutzt unabhängige Individuen, sogenannte Agenten, die in begrenztem Maß ihre Umwelt wahrnehmen und mit dieser sowie mit anderen Agenten interagieren können (Premo et al. 2005: 11). Den Agenten können einfache Verhaltensregeln, abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung, vorgegeben werden (Graham, Steiner 2006: 50). Auf dieser Basis können die Agenten „eigenständige" Entscheidungen treffen (Altaweel 2006: 30). Dabei ist es möglich, für jeden einzelnen Agenten unterschiedliche Verhaltensregeln zu definieren. Zwei wesentliche Modelltypen existieren: Ein einzelner Agent wird in eine bestimmte Umgebung „gesetzt" und interagiert mit dieser (Brantingham 2003; Premo 2005; 2006). Oder eine große Zahl an Agenten respektive Agentengruppen interagieren mit ihrer Umwelt und miteinander und bilden „künstliche Gesellschaften" (Kohler et al. 2000; Premo 2005; 2006).

Zwei wesentliche Vorteile der ABM liegen folglich darin, dass sowohl die Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt wie auch die Interaktion Mensch – Mensch auf individueller Ebene erfasst und analysiert werden können. *„Agent-based models of this type allow*

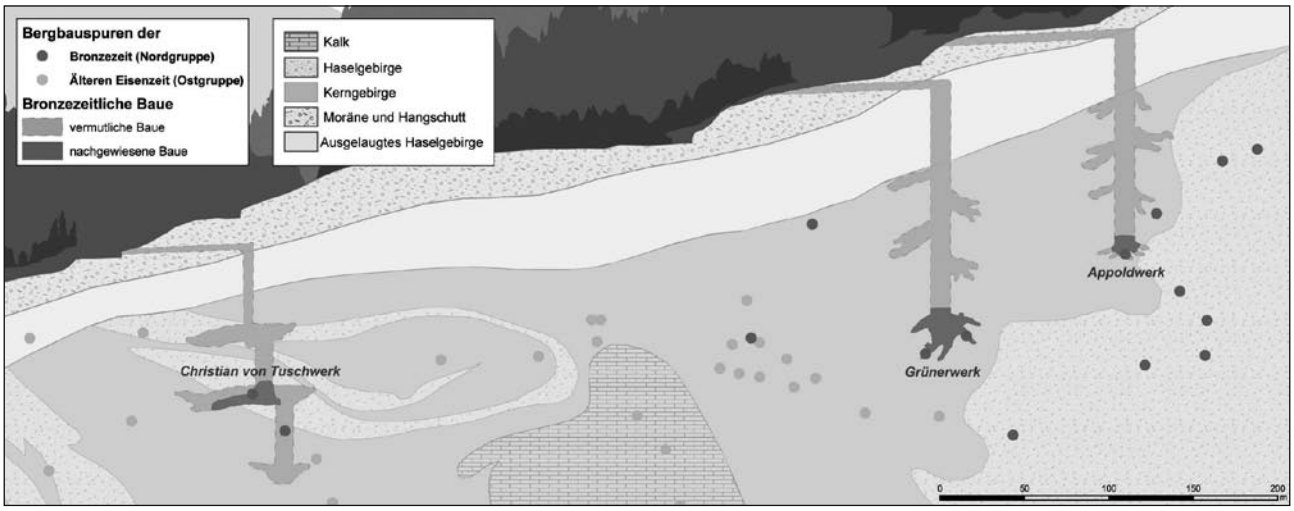

Abb. 1: Schematische Darstellung der drei bekannten bronzezeitlichen Schachtanlagen im Hallstätter Salzberg (Appoldwerk, Grünerwerk und Christian v. Tuschwerk) (© K. Löcker/H. Reschreiter, NHM Wien).

for insights into individual behaviors that create group level phenomena eventually observable by us in the archaeological record as artifact, household and settlement patterns" (Gabler 2006: 47).

Seit der Einführung von ABM Anfang der 90er Jahre in die archäologische und anthropologische Forschung (Altaweel 2006: 30) wurde es vor allem bei der Untersuchung des Verhaltens komplexer Systeme eingesetzt. Dabei lag das Augenmerk im Wesentlichen auf der Frage, inwiefern veränderte Verhaltensweisen auf der Ebene der Subeinheiten (Haushalte, Individuen) das Verhalten des übergeordneten Systems beeinflussen (Altaweel 2006: 31 mit weiterführender Literatur). Auch bei sozioökologischen Fragestellungen kam ABM zum Einsatz (Altaweel 2006: 30). In den letzten Jahren wurde ABM bei einer großen Bandbreite an Forschungsfragen genutzt, von Untersuchungen zu Nahrungsverteilung bei frühen Hominiden (Premo 2005; 2006) bis hin zu Untersuchungen zum Wassermanagment bei den Hohokam (Murphy 2006)[3].

In jüngster Zeit wurden vor allem die methodischen Konsequenzen der Anwendung von ABM für die archäologische Forschung herausgestrichen: Dies betrifft zum einen die Eignung von ABM zum Testen von Hypothesen (u.a. Gabler 2006: 43; 47; Premo et al. 2005). *„Once encoded a computer model can do what our limited imaginations do not permit: follow the implications of our ideas to find where they lead and, often, where they are inconsistent"* (Premo et al. 2005: 11). Zum anderen wurde das Potential von ABM als „cultural laboratories" betont (Premo 2005 et al.; 2007). Durch das explorative Arbeiten mit ABM („was wäre wenn"-Fragestellungen) können zahlreiche alternative historische Szenarien erstellt und erprobt werden. Dabei liegt der Fokus weniger auf der Zielsetzung, ein besonders passendes und realistisches Modell aufzubauen, sondern auf dem Versuch, eine Vielzahl an Szenarien zu erstellen und „Deckung mit" ebenso wie „Abweichung von" der realen archäologischen Fundlandschaft zu analysieren.

Die vorliegende Arbeit zielt im Besonderen auf Hypothesen-Testen und exploratives Arbeiten mit dem erstellten Modell ab.

1.2 Der bronzezeitliche Salzabbau – archäologische Theoriebildung

Die grundlegenden Daten zu den bronzezeitlichen Salzbergwerken und die hieraus resultierende Theoriebildung werden im Folgenden kurz zusammengefasst: Untertägiger Salzabbau ist im Hallstätter Salzberg seit dem 15. Jh. v. Chr. belegt. Nach heutigem Forschungsstand ist davon auszugehen, dass drei riesige Schachtanlagen mit Teufen bis 170 m gleichzeitig in Betrieb waren (Abb. 1) (Barth 1986; Barth, Neubauer 1991; Reschreiter, Kowarik 2008a).

Für die Simulation legen wir im Wesentlichen die

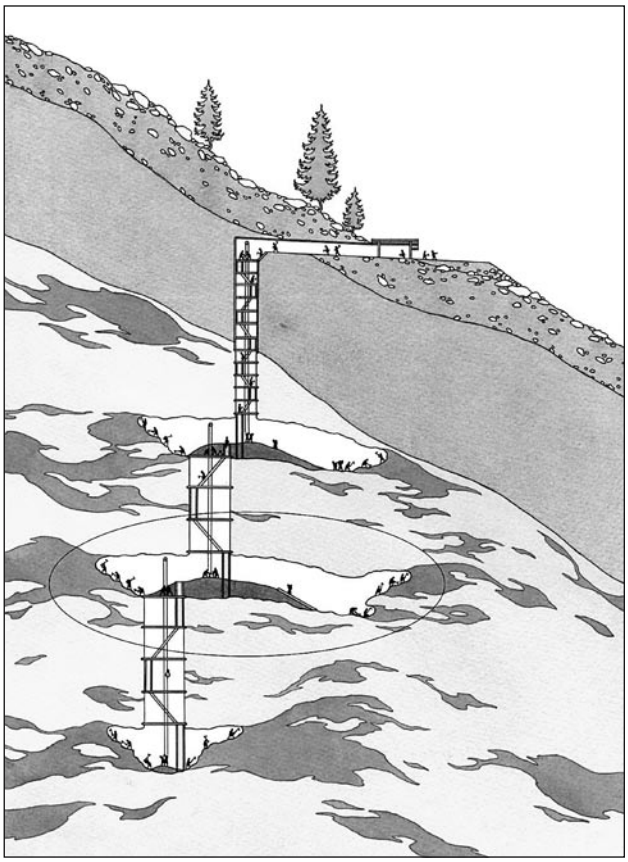

Abb. 2: Das bronzezeitliche Schachtsystem im heutigen Christian v. Tuschwerk. Die Abbauhalle in der die archäologischen Ausgrabungen stattfinden ist gekennzeichnet
(© D. Groebner/H. Reschreiter, NHM Wien).

Daten aus der Abbauhalle im heutigen Christian v. Tuschwerk zu Grunde, in dem die aktuellen Ausgrabungen der Prähistorischen Abteilung des NHM Wien stattfinden. Die dendrochronologische Datierung aller auswertbaren Hölzer aus dieser Abbauhalle fixiert einen Zeitraum von 1458-1245 v. Chr. (Grabner et al. 2006; Grabner et al. 2007). Knapp nach 1245 wurde das gesamte Abbaurevier durch einen Einbruch von Oberflächenmaterial verschüttet (Grabner et al. 2006). Das heißt die Halle wurde über einen Zeitraum von 213 Jahren „genutzt". Dies bedeutet nicht zwingend, dass während der gesamten 213 Jahre Salz abgebaut wurde. Sowohl unterhalb als auch oberhalb der relevanten Halle bestanden weitere Abbauhallen (Abb. 2) (Reschreiter, Kowarik 2008a). Der große Fundreichtum und die erstklassige Erhaltung der prähistorischen Objekte ermöglichen die Rekonstruktion des Arbeits-

Abb. 3: Die bekannten Tragsäcke sind so konstruiert, dass sie ohne Absetzen ausgeleert werden können
(© A. Rausch, NHM Wien).

ablaufs in den Abbauhallen vom Brechen des Salzes bis zum Transport an die Oberfläche[4] (Barth 1993/94: 28; Barth, Lobisser 2002: 18; Reschreiter, Kowarik 2008a: 57).

Aus folgenden Beobachtungen leiten sich die wesentlichen Argumente für die aktuelle Modellbildung ab: 1. der enorme Fundreichtum 2. der hohe Standardisierungsgrad bestimmter Werkzeuggruppen und Betriebsmittel (z.B. Schäftungen) (Barth 1967; Barth 1973; Reschreiter, Kowarik 2008a) 3. die große Funktionalität bestimmter Werkzeuggruppen und Betriebsmittel (z.B. Stiege, Tragsack: Abb. 3) (Barth 1992; Barth, Reschreiter 2005; Reschreiter, Kowarik 2008a) 4. die starke Spezialisierung bestimmter Werkzeuggruppen auf

Abb. 4: Kratze und Schwinge wurden zum Sammeln des Salzes und dem Befüllen des Tragsacks benutzt
(© H. Reschreiter, NHM Wien).

Abb. 5: Visuelle Darstellung der aktuellen Theoriebildung zum bronzezeitlichen Bergbau im Hallstätter Salzberg (© D. Groebner/H. Reschreiter, NHM Wien).

einen einzigen Arbeitsschritt (z.B. Tragsack, Schwinge, Kratze: Abb. 4) (Barth 1992; Barth, Reschreiter 2005; Reschreiter, Kowarik 2008a).

Aufgrund dieser Daten wird der bronzezeitliche Bergbau als ein straff organisierter und effizient wirtschaftender Großbetrieb mit stark optimierten Arbeitsabläufen verstanden (Abb. 5). Ein intensiver Salzabbau in nahezu industriellem Ausmaß wird angenommen (Barth 1993/94; 1998; Barth, Lobisser 2002: 14; Reschreiter, Barth 2005; Reschreiter, Kowarik 2008a).
Hieraus leiten sich im Detail folgende Annahmen ab:

- ein Arbeitsablauf, der darauf ausgerichtet ist, Stehzeiten zu vermeiden
- ein stark segmentierter Arbeitsprozess respektive intensive Arbeitsteilung
  - Es wird angenommen, dass für jeden Arbeitsschritt eigene Arbeitsgruppe bestanden (HäuerInnen, TransporteurInnen).
  - Ausgehend von der speziellen Konstruktion des Tragsacks und der außergewöhnlichen Breite der o. g. Holzstiege (Begehen im Gegenverkehrsbetrieb), wird davon ausgegangen, dass viele TransporteurInnen benötigt wurden respektive im Einsatz waren.
- ein hoher Bedarf an Arbeitskraft und Betriebsmitteln (und entsprechend ein hoher Versorgungsaufwand)

Trotz der ausgezeichneten Datenlage fehlten wesentliche Informationen, ohne die eine wirtschafts- und sozialhistorische Analyse des bronzezeitlichen Bergbaus nur in unzureichendem Ausmaß möglich ist:

1. Das tatsächliche Produktionsvolumen des bronzezeitlichen Bergbaus ist nicht bekannt. Auch die Größe des Abbaureviers insgesamt ist unbekannt, da wir nur in jene Bereiche Einblicke haben, die durch den mittelalterlichen oder neuzeitlichen Bergbau angefahren wurden (Reschreiter, Kowarik 2008b). Die prähistorischen Abbaureviere könnten also wesentlich größer sein als bislang bekannt.
2. Die Größe der Bergbaugemeinschaft ist nicht bekannt. Weder ein Gräberfeld noch eine Siedlung, die mit dem Bergbau in Beziehung gebracht werden könnten, wurden bislang entdeckt.

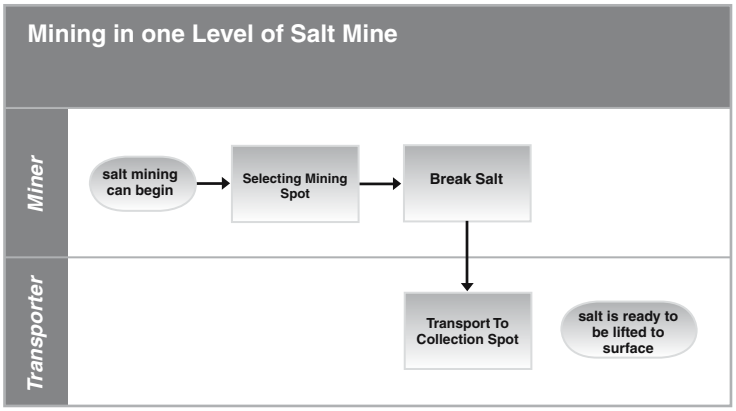

Abb. 6: Schematische Darstellung des modellierten Arbeitsprozesses (© G. Wurzer, K. Kowarik).

2. Die Agentenbasierte Simulation

2.1 Modellierung

Die Realisierung der Simulation erforderte zunächst eine präzise Formulierung der archäologischen Grundannahmen sowie eine Definition und Erhebung der notwendigen Daten. Der von uns modellierte Abbauprozess umfasst folgende Tätigkeiten (Abb. 6):

- Das feste Gebirge wird von HäuerInnen mit Bronzepickeln abgebaut (Abb. 7).
- Dabei kommt es zu einer Auflockerung des Materials (Diese wird in der Simulation berücksichtigt.).
- gebrochenes Salz sammeln
- Tragsack mit Salz befüllen
- Transport zum Schacht
- Die Salzmenge, die den Schacht erreicht, stellt den Output der Abbauhalle dar.

Der simulierte Arbeitsprozess ist auf eine Abbauhalle beschränkt und umfasst:

- die Auswahl des Abbauortes
- das Brechen des Salzes
- Sammeln des Salzes und Transport zum Füllort

Der Transport in die nächste Abbauhalle und schlussendlich an den Tag ist nicht mehr Teil der Simulation.

Es stehen zwei verschiedene Typen von ArbeiterInnen zur Verfügung:

- HäuerInnen, die das Salz brechen
- TransporteurInnen, die das Salz transportieren

2.1.1 Datenselektion und -erhebung

Die verwendeten Daten basieren zum einen auf experimentalarchäologischen Versuchen und zum anderen auf aus langjährigen Forschungen resultierenden Hypothesen.

Experimentalarchäologisch erhobene Daten: Die einzelnen Arbeitsschritte wurden mit rekonstruierten Werkzeugen nachgestellt und der Zeitaufwand gemessen (Abb. 8); das Volumen des Tragsacks (anhand archäologischer Funde) wurde gemessen (20 l)[5].

Beim Brechen des Salzes kommt es zu einer Auflockerung des abgebauten Materials (Der Auflockerungsfaktor beträgt 1,7 m^3 auf 1 m^3 festes Gebirge).

Archäologische Grundannahmen: maximale Betriebszeit der Abbauhalle (213 Jahre), Größe des initialen Abbauraums (18 m^3). Die maximale Höhe der Abbauhalle kann aufgrund folgender Argumente angenommen werden: Die nächsten Fundpunkte befinden sich 30 m oberhalb des aktuellen Grabungsgebiets. Berücksichtigt man den notwendigen Sicherheitsabstand von 6-7 m, erhält man eine maximale Höhe der Abbauhalle von 19 m. Ausgehend von den archäologischen

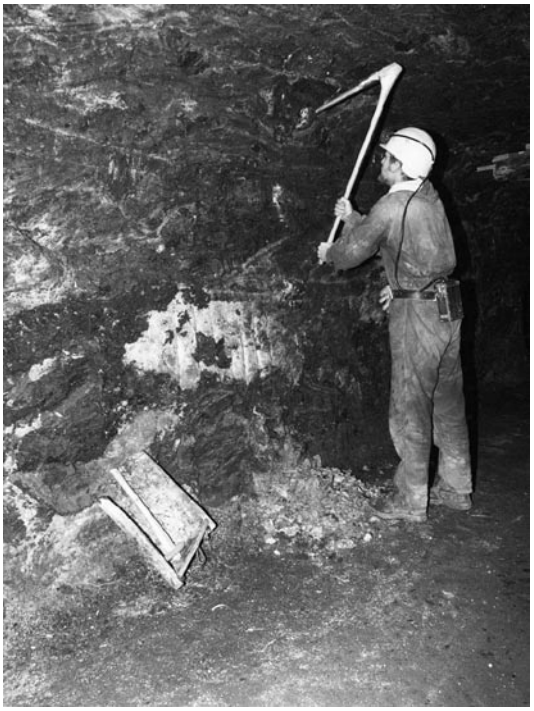

Abb. 7: Salzbrechen mit Bronzepickel (© A. Rausch, NHM Wien).

Measured Data Item	Value	Unit
Digging with a Bronze Age Tool	4,2 l / 20 min	
Filling a Carrying Sack of capacity=20 l in height=1,7m	60 s 57 s 56 s	
Walking with a filled Carrying Sack of 20 l on a Plane	9,5 s / 10 m 9,9 s / 10 m 9,6 s / 10 m	
Fill into Lift	10,5 s / 15 l 13,3 s / 15 l 10,3 s / 15 l	

Abb. 8: Tabelle der experimentalarchäologisch erhobenen Daten (© NHM Wien).

Befunden wurde die Größe des Abbaurevieres mit 40 m x 100 m x 6-19 m festgelegt. Des Weiteren wurde eine Salzverteilung mit 70% reinem Salz auf 30% taubem Gebirge als Ausgangsbasis zu Grunde gelegt. Es wird ein stufenförmiger Abbau vorausgesetzt, wobei jede Stufe eine Höhe von 2 m aufweist (Abb. 5). Basierend auf dem archäologischen Forschungsstand wird von einem auf Effizienz abzielenden, arbeitsteiligen Arbeitsprozess ausgegangen. Zur Vereinfachung wurden Ruhepausen u.ä. nicht berücksichtigt. Die ABM rechnet mit reiner Arbeitszeit.

2.2 Implementierung

Die Wahl einer Agentenbasierten Simulation erfolgte vor allem aus dem Grund, dass eine Interaktion mit der simulierten Welt gewünscht war, aber auch die Interaktion der verschiedenen Arbeitsgruppen (HäuerInnen und TransporteurInnen) beobachtet werden sollte.

Die Welt in der Simulation ist zellenbasiert, wobei jede der Zellen eine Grundfläche von 1 m^2 und eine Höhe von 2 m aufweist. Diese stellen das feste Gebirge dar und müssen eine nach der anderen abgebaut werden (Abb. 9).

Um den Simulationsvorgang zu beschleunigen wurde die Agentenbasierte Simulation mit einer diskreten Simulation in folgender Form kombiniert: Der Abbau von einer Zelle dauert 6,6 Tage. Dieser Vorgang wird nicht in Echtzeit simuliert, sondern auf ein Mal; jeder Agent der handeln will wird dazu in eine zeitlich geordnete Warteliste eingetragen („Agent 1, Salz Abbauen, Startzeit=100s), wobei der Agent der am frühesten handeln will zuerst in der Liste steht (Abb. 9). Der Simulationsalgorithmus entnimmt nun immer den ersten Agenten aus dieser Liste, stellt seine Uhr auf dessen Startzeit vor und lässt ihn seine Handlungen ausführen. Der Agent selbst schreibt sich nach Beendigung seiner Handlungen wieder in die Warteliste („Agent 1, Auf Ende Salzabbau warten, Startzeit= t+6,6T"). Neben Agenten die sich in eine zeitliche Warteliste einordnen gibt es auch Agenten die auf Ereignisse warten („Warte auf neue Abbaustelle frei"). Diese Ereignisse werden von anderen Agenten ausgelöst, so dass hiermit eine Synchronisation möglich ist.

Als Umgebung für die Simulation wurde die Software Netlogo (Tisue, Wilensky 2004) verwendet. Die Software gibt in jedem Schritt folgende Informationen an: die verstrichene Zeit, das Produktionsvolumen aufgeschlüsselt in: gebrochenes Salz, gebrochenes taubes Gebirge, Salz das an den Tag gefördert werden kann (Output) und die Zahl der arbeitenden und unbeschäftigten Agenten (Abb. 10). Diese Daten werden zusätzlich in eine Exceltabelle zur späteren Auswertung übertragen.

Die Agenten selbst werden in einen eigens geschriebenen Agenten-Editor programmiert, mit dem es komfortabel möglich ist, das „Gehirn" und damit die befolgten Abläufe festzulegen. Das so erstellte Programm wird zur Laufzeit in einen Zustandsautomaten übersetzt.

2.3 Durchführung und Resultat

Im Simulationsdurchgang wird das Modell bis zur vollständigen Erschöpfung des Salzlagers durchgerechnet. Details zur verwendeten Implementierung finden sich in Kapitel 2.2.

In der Simulation können einige Parameter variabel eingestellt werden:

- Zahl der ArbeiterInnen (HäuerInnen und TransporteurInnen jeweils getrennt)
- tatsächliche Höhe der Abbauhalle und daraus resultierend die Anzahl der Abbaustufen

Das Modell wurde mehrmals durchsimuliert, um sto-

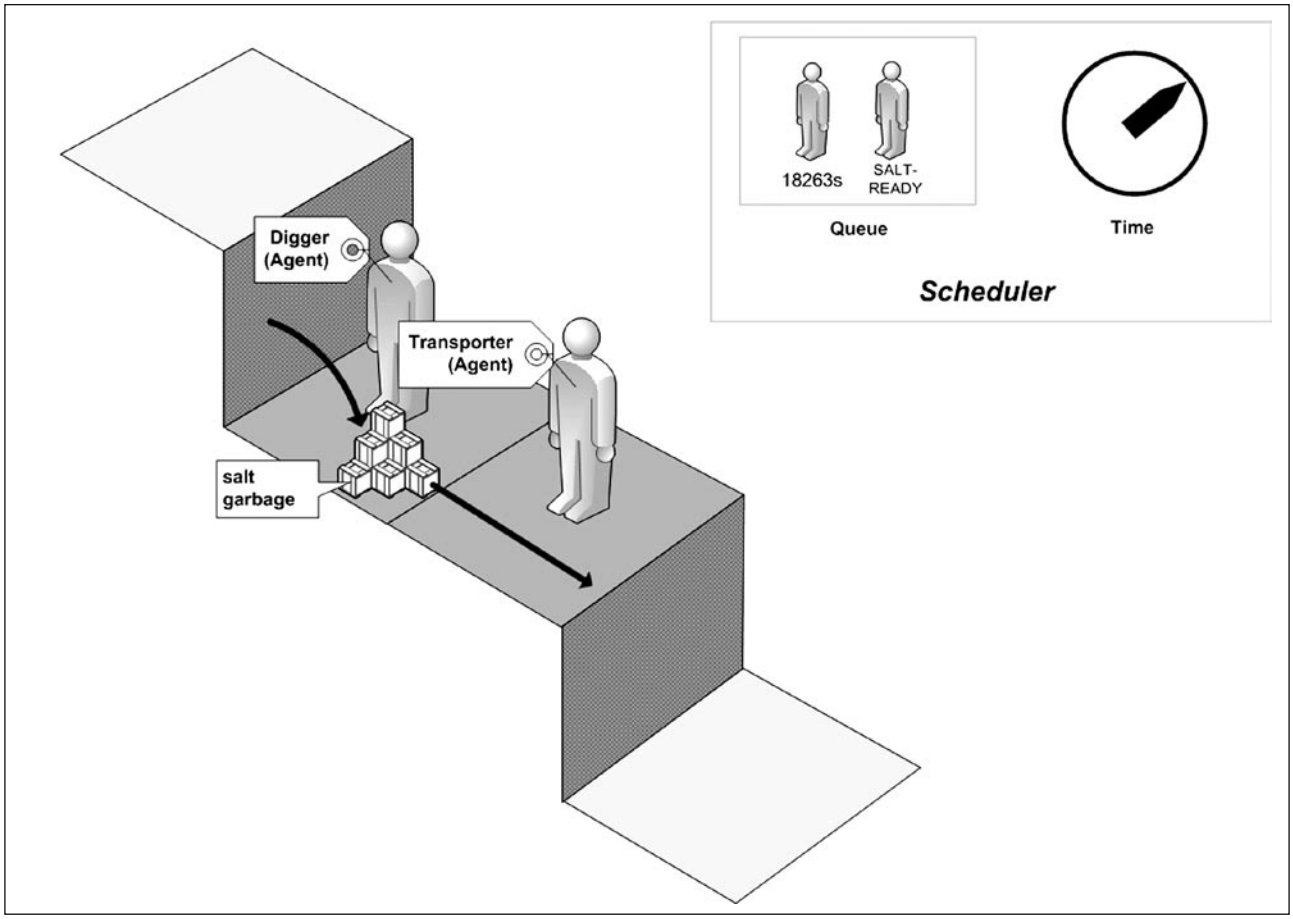

Abb. 9: Die simulierte Welt ist zellenbasiert. Jede Zellen weist eine Grundfläche von 1 m² und eine Höhe von 2 m auf. Diese stellen das feste Gebirge dar und müssen eine nach der anderen abgebaut werden (© G. Wurzer, K. Kowarik, H. Reschreiter).

chastischen Einfluss auszuschließen. Im Folgenden werden wir nur das Ergebnis eines Simulationsdurchlaufes diskutieren, da der vorliegende Beitrag vor allem darauf abzielt, eine Methode vorzustellen[6]. Das Ergebnis zeigt, dass das Ausbeuten eines Salzlagers deutlich weniger Arbeitskraft und Zeit benötigt als bislang angenommen: 25 ArbeiterInnen benötigen bei einer Hallenhöhe von 6 m knapp 14 Jahre reine Arbeitszeit, um das Salzlager auszubeuten. Hier sind wir also weit entfernt von der maximalen Zeitspanne von 213 Jahren. Doch ist zu bedenken, dass es sich um 14 Jahre reine Arbeitszeit handelt. Pausen, Schichtzeiten u.ä. sind erst einzurechnen. Wir dürfen wohl auch voraussetzen, dass es sich bei diesen 14 Jahren um die Phase der größten Leistungsfähigkeit eines Menschen handelt. Wenn wir weiter annehmen, dass diese 25 ArbeiterInnen „Vollzeit" arbeiten, d.h. keine Zeit haben ihre Versorgung mit Lebensnotwendigem zu gewährleisten, müssen wir weitere Personengruppen voraussetzen, die diese ArbeiterInnen mit Betriebsmitteln und Lebensnotwendigem versorgen, und Gruppen, die für Instandhaltung, Wartung u.ä. im Bergwerk zuständig sind. Das heißt die Bergbaugemeinschaft „wächst". Möchten wir weiter annehmen, dass die Bergbaugemeinschaft Nachwuchs aus den eigenen Reihen rekrutierte, muss die Gruppe noch weiter „wachsen". Weiterhin ist zu bedenken, dass mit großer Wahrscheinlichkeit mehr als eine Abbauhalle und mehr als ein Schachtsystem gleichzeitig betrieben wurde (Abb. 1).

Es zeigte sich, dass die Rolle der TransporteurInnen im Arbeitslauf vollkommen untergeordnet, nahezu vernachlässigbar ist. Das ist eine wesentliche Abweichung von der aktuellen Modellvorstellung, die davon aus-

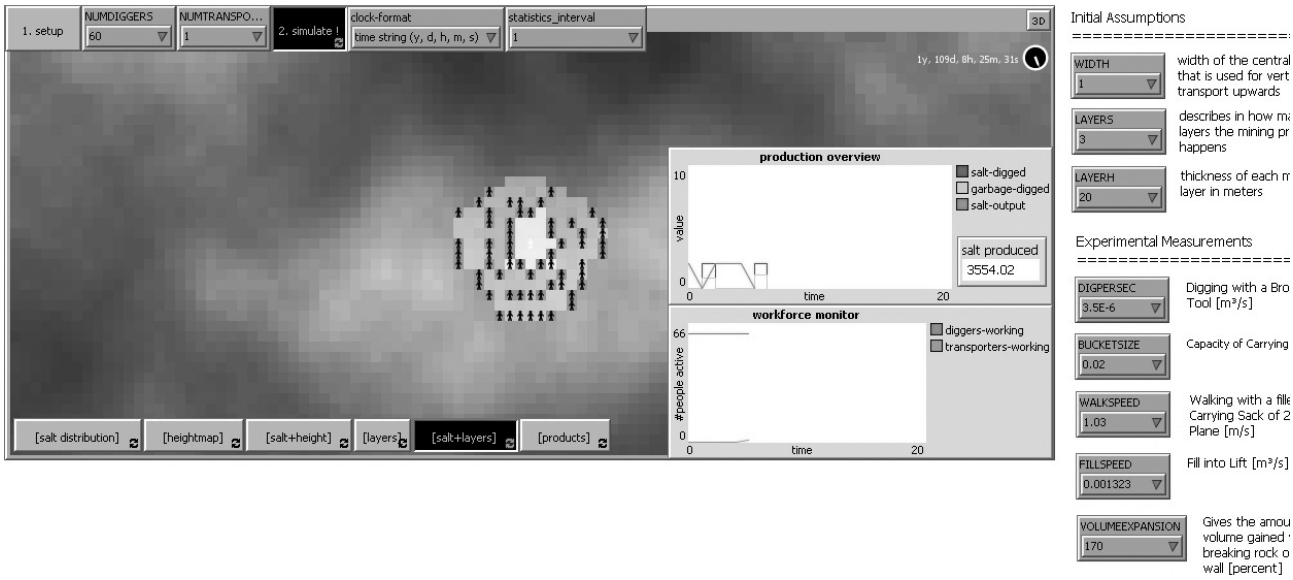

Abb. 10: Screenshot der Simulation (© G. Wurzer, K. Kowarik, H. Reschreiter).

geht, dass parallel zum Brechen des Salzes eine große Zahl an Arbeitern mit dem Sammeln und Transportieren desselben beschäftigt sein muss. Möglicherweise wurden diese Tätigkeiten also nicht parallel, sondern nacheinander ausgeführt. Außerdem wurde deutlich, dass Platzmangel den Abbauprozess stark verlangsamt. Ein solche Situation wäre in der ersten Phase nach der Erschließung der Lagerstätte denkbar. In dieser Situation wäre zuviel Arbeitskraft tatsächlich hinderlich und müsste unter Umständen auf andere Tätigkeiten ausgelagert werden.

Wir gehen davon aus, dass die somit gewonnenen Ergebnisse sowie auch unsere Methode die Grundlage für weiterführende Modellierungen in höherem Maßstab liefern können.

3. Ausblick und Conclusio

Ziel dieser Simulation war es, ein Werkzeug zum explorativen Arbeiten mit dem bestehenden archäologischen Modell zu schaffen und die wesentlichen Parameter des Abbauprozesses zu erfassen. Bereits die Darstellung der Produktionsleistung in Abhängigkeit von Betriebszeit und Personalaufwand (unter Berücksichtigung der Auflockerung und der inhomogenen Salzverteilung) erbrachte wesentliche Resultate (kürzere Betriebszeit, geringerer Personalaufwand).

Darüber hinaus war es mit Hilfe der Simulation möglich:

- den Arbeitsprozess in seiner räumlichen Struktur zu konzeptualisieren.
- Wir konnten darstellen, wie sich, unter Annahme eines auf Optimierung und Vermeidung von Stehzeiten bedachten Abbauprozesses, die Aufgabenverteilung innerhalb der Abbauhalle gestaltet. Das optimale Gleichgewicht zwischen den Arbeitsgruppen kann ermittelt werden (Wieviele TransporteurInnen kommen auf eine(n) HäuerIn) und in weiterer Folge der Grad der Arbeitsteiligkeit.
- Auch wird deutlich, welche Arbeitsschritte oder -phasen besonders kritisch bzw. vernachlässigbar sind.

Wir sehen diese Simulation als einen ersten Schritt zu einer umfassenden systemdynamischen Modellierung des gesamten Bergbaus unter Einbeziehung seines Umlandes und seiner Sekundärgewerbe, die es schließlich ermöglichen würde, den gesamten Produktionskomplex mit seinen Arbeitsabläufen und Versorgungsstrukturen zu erfassen.

Zusammenfassend zeigen die Resultate sehr deutlich das Potential Agentenbasierter Simulation für die Konzeptualisierung komplexer Arbeitsabläufe. Grundsätzlich ist das hier vorgestellte Modell mit einigen

Adaptierungen auf andere montanarchäologische Fundstellen übertragbar.

Sein wesentliches Potential sehen wir jedoch in einem anderen Bereich:

- der räumlichen Strukturierung von Arbeitsprozessen
- der organisatorischen Strukturierung von Arbeitsprozessen
  - Aufgabenverteilung
  - Grad der Arbeitsteiligkeit
  - Granularität (d.h. Detaillierungsgrad der betrachten Arbeitsschritte)

Wie sehen ABM als in besonderem Maße geeignet, komplexe wirtschafts- und sozialgeschichtliche Abläufe aber auch Produktionsprozesse (chaîne operatoire) zu erfassen und zu konzeptualisieren.

Dank

Einen herzlichen Dank an Luke S. Premo (Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig) für Diskussion und Literaturunterstützung. Vielen Dank auch an Bettina Gabriel, Thomas Koch-Waldner und Martin Obenaus für ihre Unterstützung bei der experimentalarchäologischen Datenerhebung.

Notes

1 Zur Verwendung des Begriffs Modell: Der Begriff Modell wird im weiteren mit zwei Bedeutungsinhalten verwendet. Zum einen bezeichnet der Begriff die archäologische Theoriebildung zu dem prähistorischen Salzbergbau. In diesem Fall werden Ausdrücke wie Erklärungsmodell, verbales Modell, archäologisches Modell verwendet. Zum anderen bezeichnet der Begriff das aus der Agentenbasierten Modellierung hervorgegangene „Modell". In diesem Fall wird nur der Ausdruck Modell oder aber digitales Modell verwendet.

2 ArbeiterInnen, HäuerInnen, TransporteurInnen wird im Weiteren weniger aus genderpolitischen Gründen verwendet, sondern vielmehr aus dem Grund, dass für die Ältere Eisenzeit in Hallstatt eindeutige Hinweise auf schwere Arbeitsbelastung bei Frauen und Männern vorliegen und diese mit großer Wahrscheinlichkeit mit der Arbeit im Bergwerk in Verbindung zu bringen sein dürften (Pany 2003; 2008).

3 Für einen umfassenden Überblick über jüngere Arbeiten mit ABM siehe die CAA 2006 Session „Social Modeling and Simulation Symposium" in: Clark, Hagmeister 2006: 16-59 und die Website der Agent-Based Modeling Group and der University of Arizona (www.u.arizona.edu/□jtmurphy/ABM/ABM.htm).

4 Alles organische Material, das in den prähistorischen Gruben zurückgelassen wurde oder verloren ging, hat sich dank der konservierenden Wirkung des Salzes bis heute erhalten (Grubenholz, Holzwerkzeuge, Gras- und Bastschnüre, Fell, Leder, Textil, menschliche Exkremente etc.). Dieser Betriebsabfall – auch Heidengebirge genannt – blieb am Boden der Abbauhallen liegen und ist inzwischen wieder fest mit dem Berg verwachsen.

5 Die Daten wurden durch R. Totschnig, B. Gabriel, T. Koch-Waldner, M. Obenaus und A. Rausch erhoben.

6 Eine umfassende Analyse und Diskussion aller Ergebnisse der ABM ist Teil einer Doktorarbeit (K. Kowarik, Insitut für Ur- und Frühgeschichte, Betreuung F. Daim, Universität Wien).

Literatur

Altaweel, M. (2006), Adressing the Structures and Dynamics of Modeled Human Ecologies. In: Clark, J., Hagemeister J. [eds.], Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Budapest Archaeolingua: 30-41.

Barth, F. E. (1967), Prähistorische Knieholzschäftungen aus dem Salzberg zu Hallstatt, OÖ. Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft Wien: 254-272.

- (1973), Versuch einer typologischen Gliederung der prähistorischen Funde aus dem Hallstätter Salzberg. Mitt. Anthropol. Ges. Wien 102: 26-30.

- (1992), Zu den Tragsäcken aus dem Salzbergwerk Hallstatt. Arch. Austriaca 76: 121-127.

- (1986), Der urzeitliche Bergbau im Grüner Werk des Salzbergwerkes Hallstatt. Hallstatt.

- (1993/94), Ein Füllort des 12. Jahrhunderts v. Chr. im Hallstätter Salzberg. Mitt. Anthropol. Ges. Wien 123/124: 27-38.

- (1997), Prähistorische Knieholzschäftungen aus dem Salzberg zu Hallstatt. OÖ. Mitt. Anthropol. Ges. Wien 96/97: 254-272.

- (1998), Bronzezeitliche Salzgewinnung in Hallstatt. In: Hänsel, B. [Hrsg.], Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas. Kiel: 123-128.

Barth, F. E., Lobisser, W. (2002), Das EU-Projekt Archaeolive und das archäologische Erbe von Hallstatt. Wien: Veröffentlichungen aus dem Naturhistorischen Museum in Wien, Neue Folge 29.

Barth, F. E., Neubauer, W. (1991), Salzbergwerk Hallstatt „Appoldwerk Grabung 1879/80“. Hallstatt.

Brantingham, P. J. (2003), A Neutral Model of Stone Raw Material Procurement. American Antiquity 68: 487-509.

Clark, J., Hagmeister, J. [eds.] (2006), Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Budapest: Archaeolingua.

Gabler, B. M. (2006), Ethnic Boundary Maintenance and Historical Archaeology from an Agent-based Modeling Perspective. In: Clark, J., Hagmeister, J. [eds.] (2006), Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Budapest: Archaeolingua: 42-48.

Grabner, M., Reschreiter, H. Barth, F. E., Klein, A., Geihofer D., Wimmer, R. (2006), Die Dendrochronologie in Hallstatt – Ein Statusbericht. Archäologie Österreichs 17/1: 40-49.

Grabner, M., Klein, A., Geihofer, D., Reschreiter, H., Barth, F. E., Wimmer, R., (2007), Bronze Age dating of timber from the salt-mine at Hallstatt, Austria. Dendrochronologia 24: 61-68.

Graham, S., Steiner, J. (2006), TravellerSim: Growing Settelment Structures and Territories with Agent-Based Modeling. In: Clark, J., Hagmeister, J. [eds.] (2006), Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Budapest. Archaeolingua: 29-26.

Kohler, T. A., Kresl, J., Van West, C., Carr, E., Wilhusen, R. H. (2000), Be there then: a modeling approach to settlement determinants and spatial efficiency aming Late Ancestral pueblo populations of the Mesa Verde region, U. S. Southwest. In: Clark, J., Hagmeister, J. [eds.] (2006), Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-based Modeling of Social and Spatial Processes. Oxford und New York: Oxford University Press: 145-178.

Pany, D. (2003), Mining for the miners? An analysis of occupationally - induced stress markers on the skeletal remains from the ancient Hallstatt cemetery. [unpubl. Diplomarbeit an der Universität Wien].

- (2008), Die Bevölkerung des Hallstätter Hochtales in der Älteren Eisenzeit. In: Kern, A., Kowarik, K., Rausch, A., Reschreiter, H. [Hrsg.], Salz-Reich, 7000 Jahre Hallstatt. Wien: Veröffentlichungen der Prähistorischen Abteilung (VPA) 2: 136-141.

Premo, L. S. (2005), Patchiness and Prosociality: An Agent-based Model of Plio/Pleistoscene Hominid Food Sharing. In: Davidsson, P., Takadama, K., Logan, B. [eds.], Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation. Berlin: Springer: 210-224.

- (2006), Patchiness and Prosociality: Modeling the Evolution and Archaeology of Plio-Pleistoscene Hominin Food Sharing [PhD Dissertation, University of Arizona, Tuscon].

- (2007), Exploratory Agent-based Models: Towards an Experimental Ethnoarchaeology. In: Clark, J., Hagmeister, J. [eds.] (2006), Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage [CAA 2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology]. Budapest. Archaeolingua: 29-26.

Premo, L. S., Murphy, J. T., Scholnick, J. B., Gabler, B. M., Beaver, J. M. (2005), Making a Case for Agent-Based Modeling. SAS Bulletin Fall 2005: 11-12.

Reschreiter, H., Barth, F. E. (2005), Neufund einer bronzezeitlichen Holzstiege im Salzbergwerk Hallstatt. Archäologie Österreichs 16/1: 27-32.

Reschreiter, H., Kowarik, K. (2008a), Bronzezeit – der Aufschwung, Der Salzbergbau beginnt. In: Kern, A., Kowarik, K., Rausch, A., Reschreiter, H. [Hrsg.], Salz-Reich, 7000 Jahre Hallstatt. Wien: Veröffentlichungen der Prähistorischen Abteilung (VPA) 2: 48-64.

Reschreiter, H., Kowarik, K. (2008b), Die Geschichte einer Entdeckung. In: Kern, A., Kowarik, K., Rausch, A., Reschreiter, H. [Hrsg.], Salz-Reich, 7000 Jahre Hallstatt. Wien: Veröffentlichungen der Prähistorischen Abteilung (VPA) 2: 24-32.

Tisue, S., Wilensky, U. (2004), Netlogo: Design and Implementation of a Multi-Agent Modeling Environment. In: Proceedings of Agent 2004 Conference. Chicago, IL.