



**INTERNATIONAL CONGRESS  
OF EGYPTOLOGISTS XI**

**Florence, Italy 23 - 30 August 2015**

**MUSEO EGIZIO FIRENZE  
FLORENCE EGYPTIAN MUSEUM**

## **Grundsatzüberlegungen zum Bau der Pyramiden im Alten Reich**



## Grundsatzüberlegungen zum Bau der Pyramiden im Alten Reich

### 11. Internationaler Ägyptologenkongresses 2015

Zum Bau der Pyramiden im Alten Ägypten wurden in der Vergangenheit viele Hypothesen vorgelegt – auch von namhaften Ägyptologen. In diesem Beitrag werden einige grundsätzliche Überlegungen und Feststellungen vorgestellt und eine Bewertung bisher veröffentlichter Bauhypothesen vorgenommen. Im Anschluss daran wird eine darauf basierende Lösung zum Bau der Pyramiden im alten Reich erläutert.

#### 1. Einführung

Die Lebenserwartung der Menschen im Alten Ägypten lag durchschnittlich bei etwa 35 Jahren. Trotz des hohen Standards der Humanmedizin verliefen viele Entzündungen, insbesondere auch als Folgen von Verletzungen, tödlich. Selbst bei überdurchschnittlich guten hygienischen Wohnverhältnissen, bei hervorragender medizinischer Betreuung und bei bester Ernährung waren auch Könige und hochgestellte Persönlichkeiten immer wieder von unerwartet auftretenden tödlichen Erkrankungen betroffen.

So starben von den 22 Königen der 3. bis 6. Dynastie, denen Pyramiden zugeordnet werden konnten, insgesamt mindestens sechs vor der Fertigstellung ihres Grabmals: Sechemchet, Chaba, Djedefre, Bicheris, Schepseskare und Neferefre.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass der jeweilige König bei Antritt seiner Regentschaft die Planung und den Bau seiner Pyramide als Grabmal und deren schnellstmögliche Fertigstellung veranlasste. Eine möglichst kurze Bauzeit bestimmte daher das anzuwendende Bauverfahren. Sie hatte für den Bau der Pyramide oberste Priorität.

#### 2. Grundsätzliche Überlegungen und Feststellungen

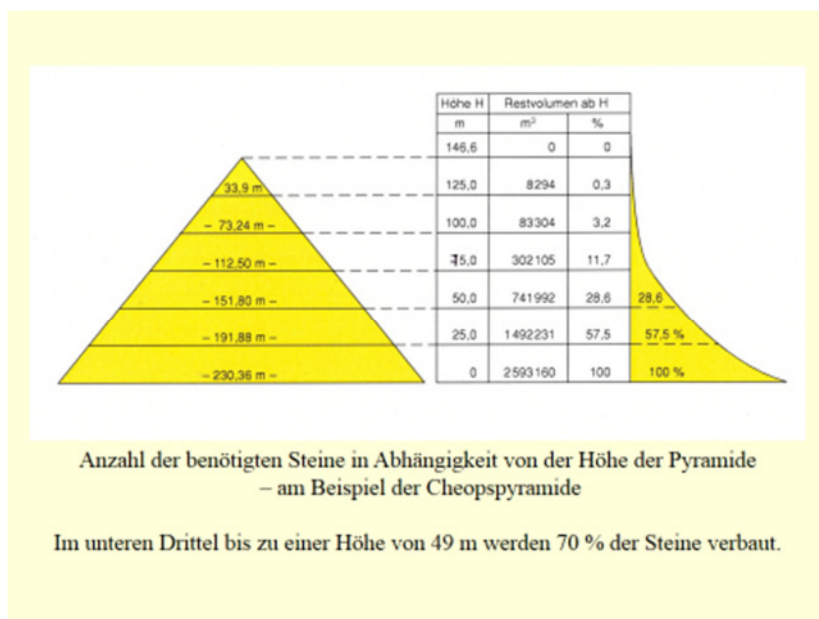


Bild 1

Im unteren Drittel einer Pyramide werden 70% der Steine verbaut. Am Beispiel der Pyramide des Cheops wird dies deutlich: In 49 m Höhe beträgt das restliche, noch zu verbauende Steinvolumen nur noch 30 %.

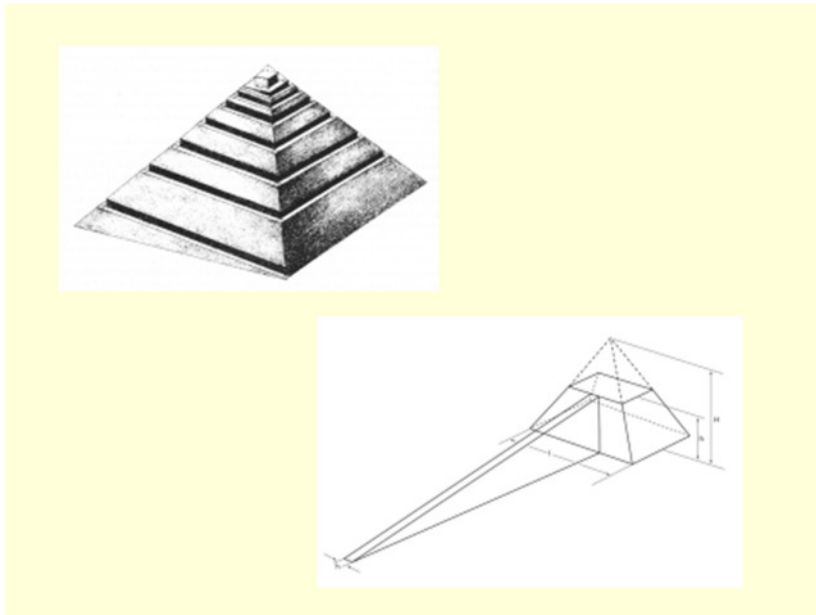


Bild 2

Der Materialtransport über nur **eine** Rampe führt stets zu einem höheren Zeitaufwand als ein Transport gleichzeitig über mehrere Rampen (Bild 2). Auf vielen Baustellen war zudem kein Platz für derartig lange, senkrecht auf die Pyramide zuführende Rampen.

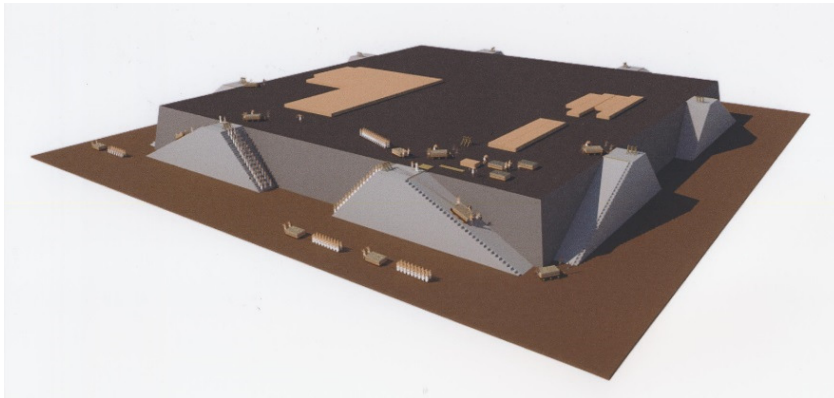


Bild 3

Daraus ergibt sich die **Feststellung 1**: Eine möglichst kurze Bauzeit kann nur durch **zeitgleiches** Bauen auf allen vier Seiten der Pyramide erreicht werden (Bild 3). Die Anzahl der tangential an den

Seiten der Pyramide angebrachten Rampen bestimmt die Bauzeit.

Eine umfangreiche Lagerhaltung von Steinen an der Baustelle war aus Platzgründen nicht möglich. Im Alten Reich sind Hebeeinrichtungen archäologisch nicht belegt. Der Schaduf wird erstmals im Neuen Reich erwähnt. Eine Stapelung von Steinen als eine Form der Lagerhaltung kam daher auch nicht in Frage.

Daraus folgt die **Feststellung 2** (Bild 4): Die Steinproduktion, der Transport der Materialien zur Baustelle und der Bau der Pyramide selbst mussten zeitlich stets aufeinander abgestimmt sein. Heute bezeichnen wir ein in seinen einzelnen Bereichen miteinander verzahntes System als „**just in time**“ (Bild 4). Es ist jedoch keineswegs eine Erfindung unseres Zeitalters. Beim Bau der Pyramiden im Alten Reich wurde dieses Verfahren bereits verwendet.

Für die Bauzeit der Pyramide war demnach der Zeitaufwand für den Transport der Steine über die steilen tangential angeordneten Rampen bis zur Einbauebene der entscheidende Faktor.

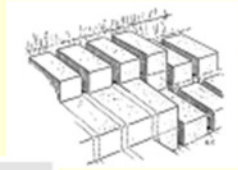
Die tagtäglich benötigten Steinmengen konnten auch in mehreren Steinbrüchen parallel hergestellt werden. Für den Bau der Pyramide des Cheops und der Roten Pyramide ist dies archäologisch nachgewiesen.

Auch der Transport von den Steinbrüchen zur Baustelle konnte – so z. B. beim Bau der Roten Pyramide und der Pyramide des Cheops – gleichzeitig über mehrere Transportrampen erfolgen.



## 2. Feststellung: Just in time

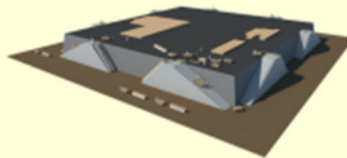
Steinproduktion;  
in jeweils benötigter  
Menge möglich



Transport zur Baustelle;  
in jeweils benötigter Menge  
möglich

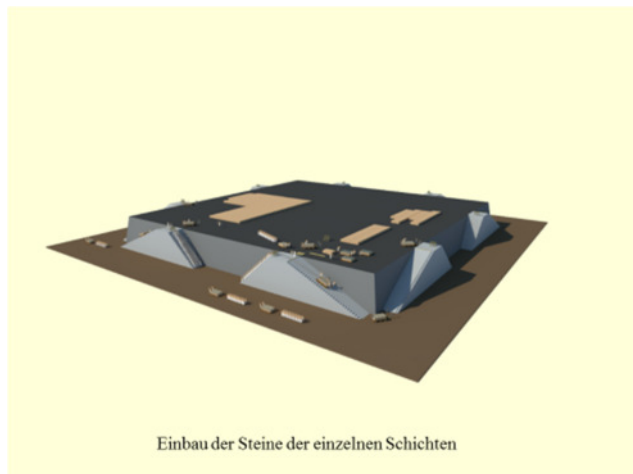


Bau der Pyramide  
Steintransport über steile  
Rampen bestimmte die  
„Bauzeit“



Just in time

Bild 4

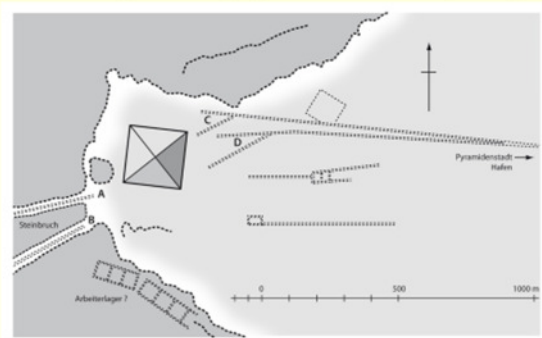


Einbau der Steine der einzelnen Schichten

Bild 5

Das waagerechte Verschieben und der Einbau der Steine in der jeweils obersten Schicht des Pyramidenstumpfes konnten von einer größeren Anzahl von Arbeitern zeitgleich vorgenommen werden. Beide Arbeitsvorgänge waren nur von der Menge der über die Rampen hoch gezogenen Steine abhängig und für die Bauzeit daher auch nicht entscheidend

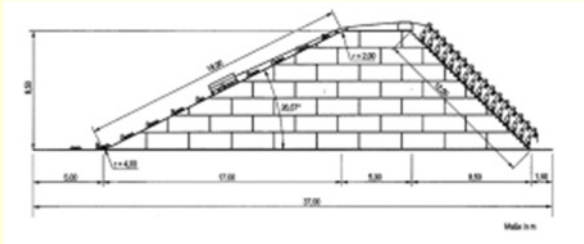
## 3. Feststellung: Max. Steigung 7 – 8 ° bei den Transportrampen



Transportrampen bei der Roten Pyramide

Die **Feststellung 3** besagt: Die Transportrampen von den Steinbrüchen zur Baustelle wiesen – wie archäologisch belegt – nur eine maximale Steigung von 7° - 8° auf. Damit konnte ein Zurückrutschen der Steine bei notwendigen Pausen der Zugmannschaften bzw. der Ochsenspanne vermieden werden. Die Haftreibung musste stets größer als die Hangabtriebskraft sein.

4. Feststellung: Steile, kurze Rampen mit einer Neigung von ca. 26°



Rampe entsprechend Abmessungen der Kernstufen der Mykerinospyramide (Neigung 2 : 1)

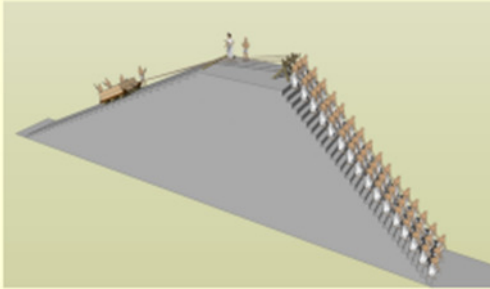


Bild 6

**Feststellung 4:**

Dagegen können die an den vier Seiten der Pyramide angeordneten Tangentialrampen wegen der kurzen Zugstrecken wesentlich steiler gebaut werden. Zugpausen waren nicht nötig (Bild 4).

Einige Anmerkungen zur **Bauweise der Pyramiden**



Stumpf der Pyramide des Sechemchet (links)

Prinzip der Schichtpyramide (rechts)

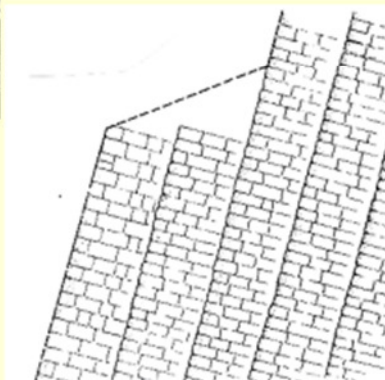


Bild 7

Die Bauweise der Pyramide des Djoser und der des Semenhet in Sakkara Nord, der des Chaba in Saujet el-Arjan und deren des Snofru in Meidum und Dahschur Süd wird in der modernen Literatur als „Schichtbauweise“ bezeichnet: Schräg aneinander aufgeführte Steinschichten bilden ohne Verbindung miteinander den Pyramidenkern (Bild 7).



Rote Pyramide in Dashur Nord

Bild 8

Infolge der in den vergangenen 4000 Jahren in Ägypten immer wieder stattgefundenen teilweise starken Erdbeben kam es u.a. bei der Pyramide in Meidum, bei der Knickpyramide in Dachschr Süd und der Roten Pyramide in Dachschr Nord zu größeren Bauschäden. Dazu trug auch eine zu hohe Bodenpressung auf teilweise nicht standsich-

erem Untergrund bei. Das Gewicht dieser Pyramiden pro m<sup>2</sup> liegt weit über dem moderner Hochbauten.

Die Baumeister des Snofru entschieden sich daher, im oberen Teil der Knickpyramide, beim Bau der Nebenpyramide zur Knickpyramide und beim Bau der Roten Pyramide eine waagerechte Steinverlegung vorzunehmen. Bei der Roten Pyramide erfolgte darüber hinaus eine Verringerung des Rücksprungs auf 28 Finger pro Elle, also auf einen Winkel von 45° (Bild 8; Rote Pyramide in Dashur Nord).



Cheopspyramide

Bild 9

Beim Bau der Pyramide des Cheops wurde eine weitere Änderungen durchgeführt: Als Bauplatz wurde das sehr stabile Nummulitenkalksteinplateau bei Gisa ausgewählt. Zudem wurde die Pyramide vermutlich in einer **Kernstufenstruktur** errichtet, die nach deren Fertigstellung verkleidet wurde. Dies ergaben Untersuchungen und Vermes-

sungen des Vortragenden an der Pyramide des Cheops.

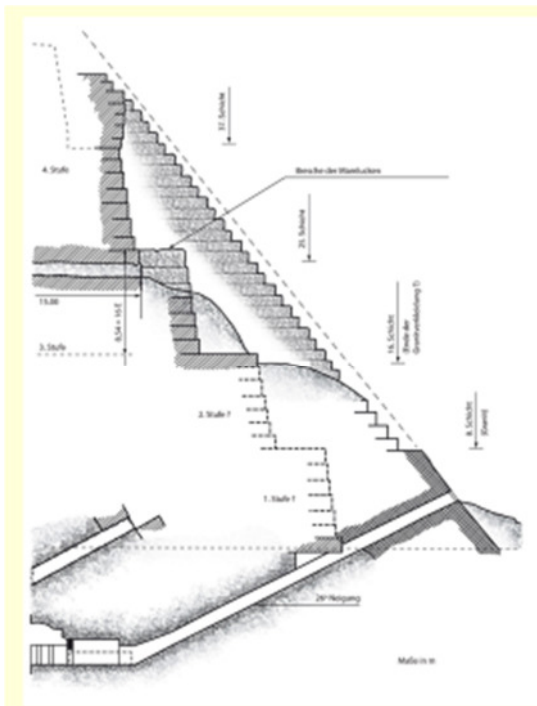




Pyramide des Mykerinos

Bild 10

Deutlich zu erkennen ist diese Kernstufenstruktur bei der Pyramide des Mykerinos in deren bis zu 8 m tiefen Bresche, welche die Mameluken bei der Suche nach dem Eingang geschlagen haben (Bild 10).



Die in der Bresche der Mykerinospyramide sichtbaren Stufen des Kernmauerwerks

Bild 11

Das Innere der Pyramide besteht danach aus übereinander gebauten, Mastaba ähnlichen rechteckigen „Steinkästen“, deren Grundrisse nach oben hin kleiner werden. Die leicht nach innen geneigten Außenwände sind aus exakt behauenen Steinen ausgeführt;

im Inneren sind Steine unterschiedlicher Formate verbaut, deren Zwischenräume zur gleichmäßigen Druckverteilung mit Sand und Tafla aufgefüllt wurden. Der Vorteil dieser Bauweise besteht darin, dass Erdstöße viel elastischer als bei einem stabilen Mauerwerk abgefangen werden können.

Die zweite, dritte und vierte Stufe ist in einem von Maragioglio und Rinaldi erstellten Querschnitt der Nordseite deutlich zu erkennen (Bild 11).



Bild 12

Auch an den Königinnenpyramiden des Cheops und Mykerinos (im Bild) ist die Kernstufenstruktur deutlich zu erkennen (Bild 12).



sichtbare Kernstufenstruktur der Pyramide des Neferirkare in Abusir

Bild 13

Die Bauweise der Kernstufenstruktur und der äußeren Verkleidung der Pyramiden wurde bis Ende der 6. Dynastie beibehalten und ist archäologisch belegt (Bild 13).

Die **Feststellung 5** lautet daher: Die Pyramiden der 4. bis 6. Dynastie sind nachweislich ab dem Bau der Cheopspyramide als Stufenpyramiden errichtet. In der modernen Literatur findet diese Bezeichnung zunehmend Verwendung.



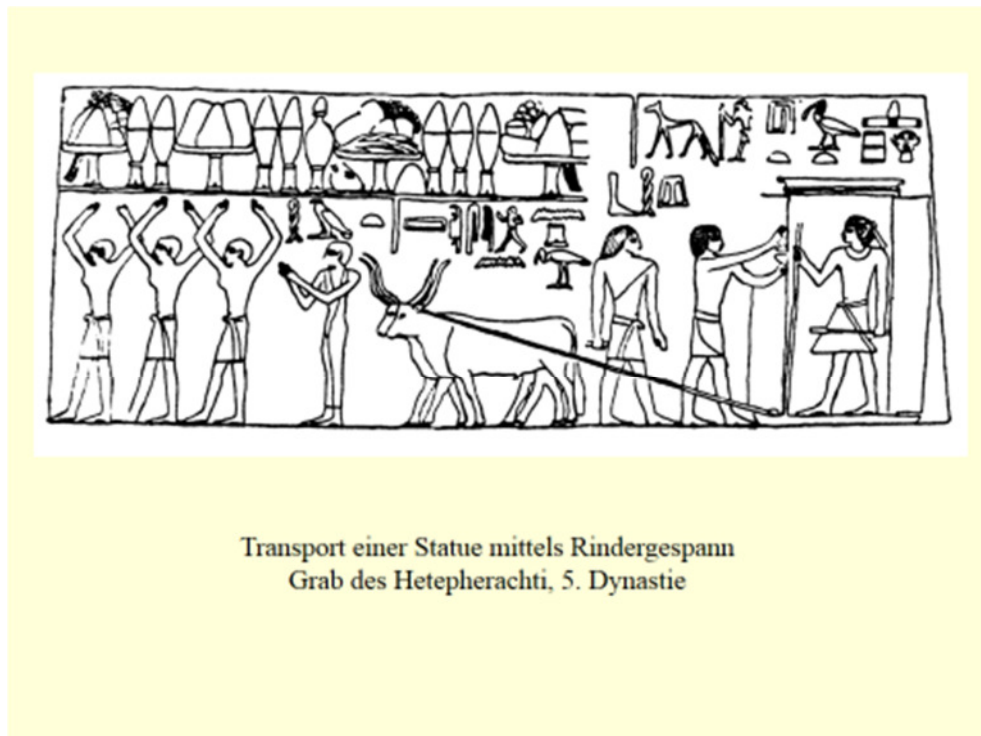


Bild 14

Eine weitere **Feststellung, Nr. 6**, lautet: Der Bau der Außenverkleidung der Pyramide, das Aufsetzen des Pyramidion und das anschließende Glätten der Außenverkleidung von oben nach unten können bautechnisch nur bei Verwendung außerhalb der

Außenverkleidung angebrachter Baugerüste bzw. Plattformen durchgeführt worden sein (Bild 14). Die Arbeiter brauchten für diese Arbeiten feste und sichere Standflächen.

Bild 15

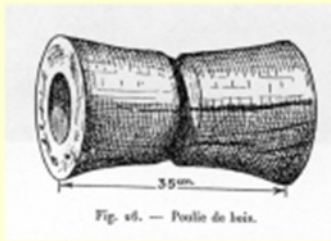


Transport einer Statue mittels Rindergespann  
Grab des Hetepherachtis, 5. Dynastie

Die 7. und letzte **Feststellung** sagt aus, dass Hypothesen zum Bau der Pyramiden im Alten Reich nur archäologisch belegte Werkzeuge, Hilfsmittel sowie Verfahren zur Materialgewinnung und zum Transport einbeziehen dürfen. Dabei handelt es sich um Kupfermeißel, Stein-

kugeln aus Dolerit, Holzbalken als Hebel, Transportschlitten (Bild 15), schiefe Ebenen und Rampen, Walze und Umlenkrolle (Bild 16), Seile sowie Messstäbe, Winkellehren und Messstricke (Bild 17).

Rolle, Seilumlenkung



Seilumlenkrolle aus der Pyramide des Djoser (links oben)  
 Seilumlenkeinrichtung aus dem Taltempel des Chephren (unten)

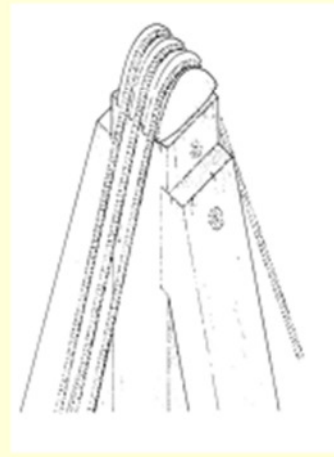
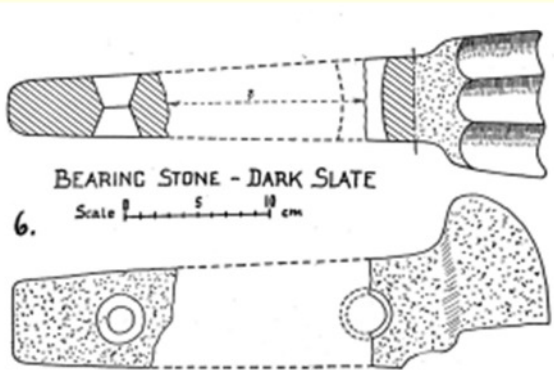


Bild 16

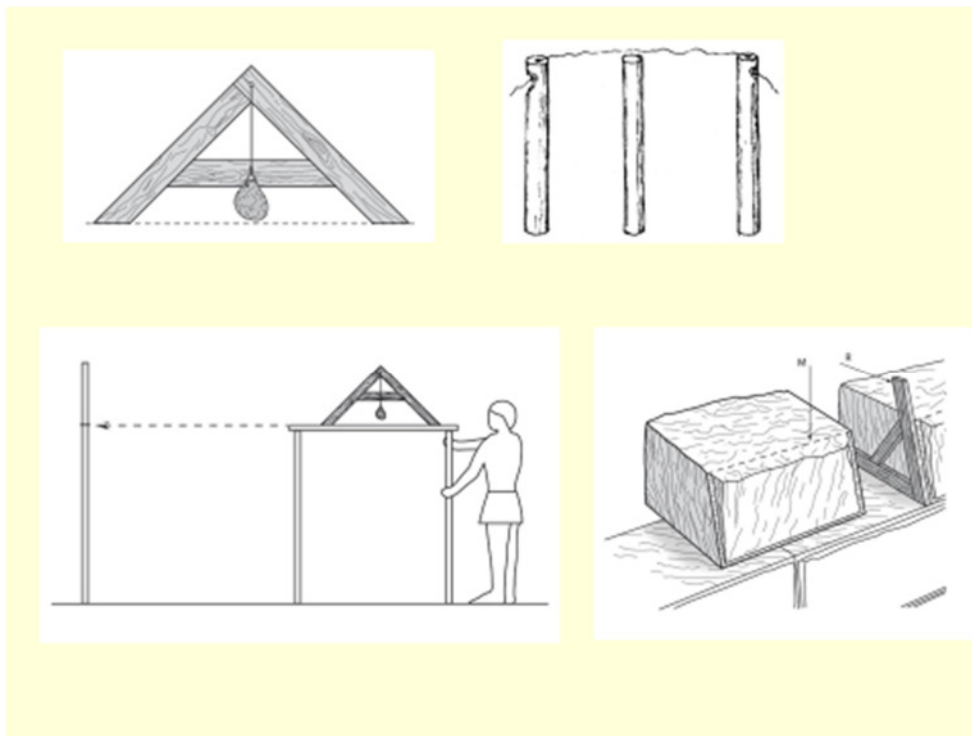


Bild 17

Mit den dargelegten sieben Feststellungen, die sich aus den bautechnischen Notwendigkeiten, den archäologischen Befunden und den zeitlichen Vorgaben ableiten, sind die wesentlichen Voraussetzungen für den Bau der Pyramiden im Alten Reich definiert.

### 3. Bewertung bisher veröffentlichter Bauhypothesen

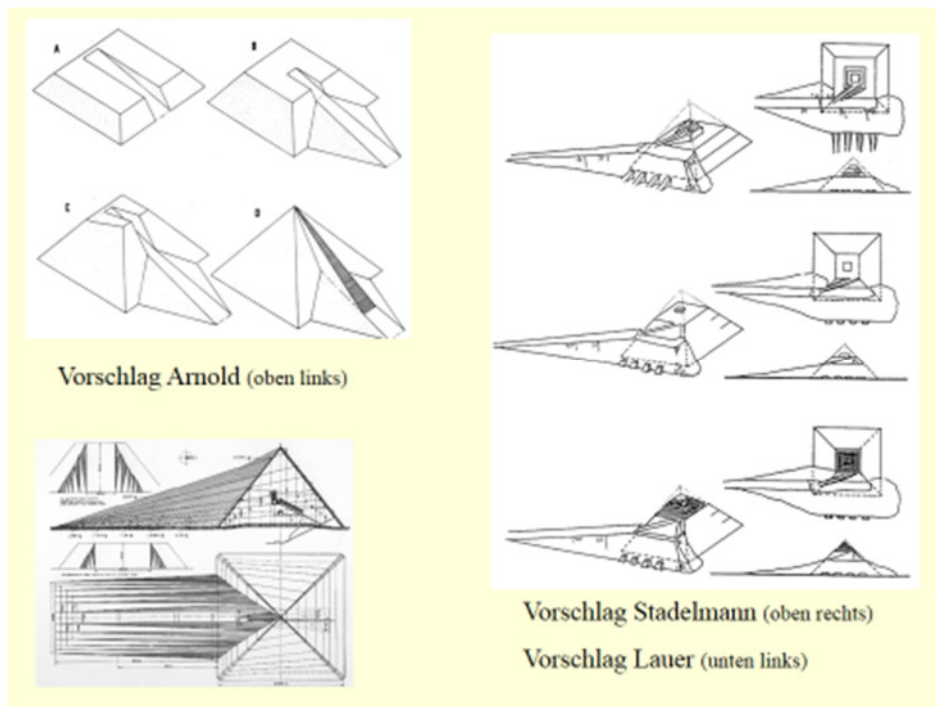


Bild 18

Den bisher von Ägyptologen wie u.a. von Arnold, Lauer und Stadelmann veröffentlichten Bauhypothesen liegen senkrecht auf die Pyramide zuführende Rampen zugrunde. Diese haben eine gegenüber Tangentialrampen geringere Transportkapazität. Der Bau der Rampen erfordert teilweise eine beachtliche Menge an Baumaterial und eine große Fläche. Eine kürzest mögliche Bauzeit ist mit diesen Vorschlägen nicht zu erreichen (Bild 18).

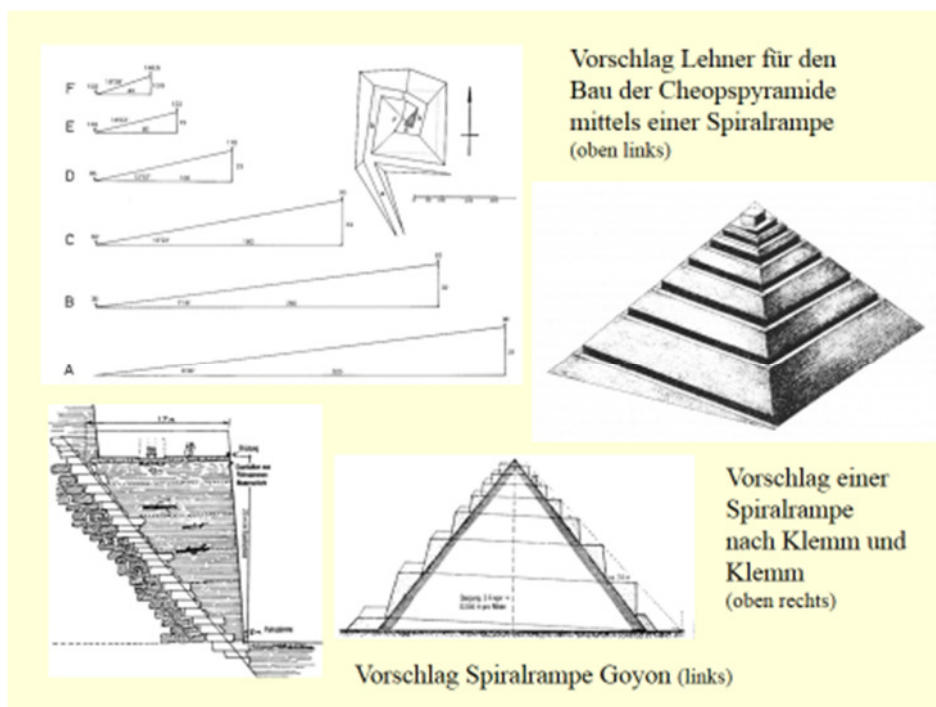


Bild 19



Ähnliches gilt für die u.a. von Goyon, Lehner und Klemm vorgeschlagenen Bauhypothesen mit einer spiralförmig um den Pyramidenstrumpf angeordneten Rampe (Bild 19).

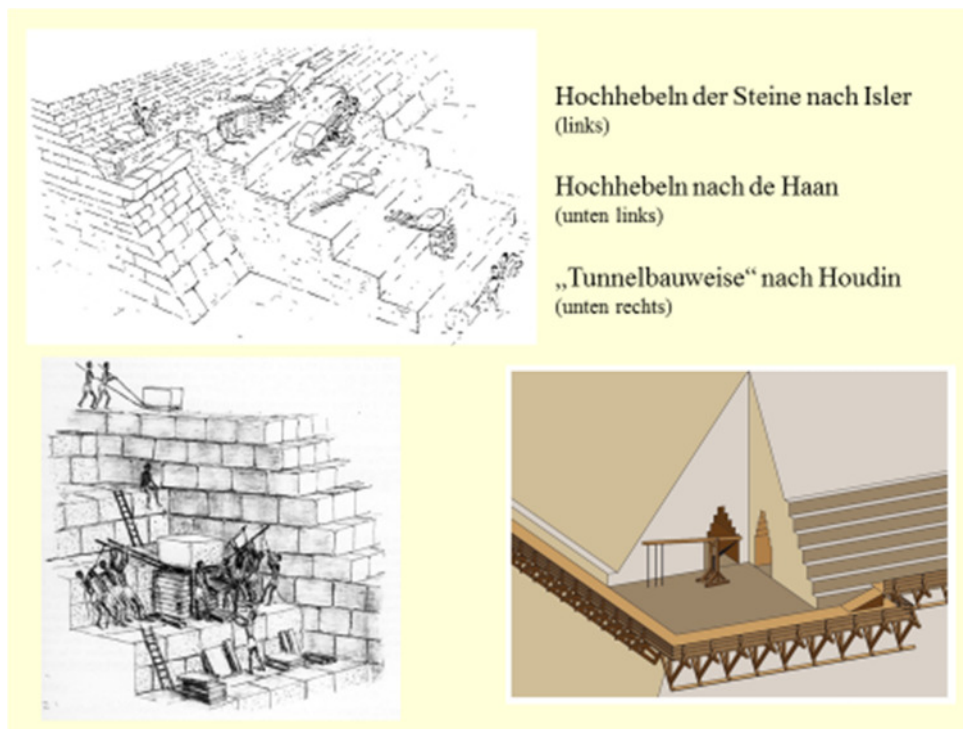


Bild 20

Weitere Bauhypothesen wie von den Haan, Houdin und Isler scheiden aus einer Reihe von Gründen ebenfalls aus (Bild 20).

Die meisten der bisher vorgelegten Hypothesen zum Pyramidenbau weisen auch keine schlüssige Lösung für das Aufsetzen des Pyramidion und das Glätten der Außenfläche der Pyramide von oben nach unten auf. Auch Berechnungen der Bauzeiten fehlen bei den meisten Vorschlägen.

Die von Nichtägyptologen vorgelegten Bauhypothesen vernachlässigen darüber hinaus sehr oft die archäologischen Befunde von Bauverfahren und Werkzeugen im Alten Reich, wie sie in Feststellung 7 formuliert wurden.

#### **4. Pyramidenbau unter Verwendung steiler Tangentialrampen und Umbauungen**

##### **Die einzelnen Bauphasen**

Die einzelnen Bauphasen eines Vorschlags für den Bau der Stufenpyramiden im Alten Reich unter Verwendung steiler Tangentialrampen und Umbauungen sollen am Beispiel der Pyramide des Mykerinos dargestellt werden:

Das Kernmauerwerk der Pyramide des Mykerinos wurde wahrscheinlich nach Erstellung der Basisfläche in 6 Stufen errichtet (siehe Bild 11). Über die Tangentialrampen konnte Baumaterial zeitgleich auf allen vier Seiten nach oben transportiert werden (Bild 21). Nach Fertigstellung des Kernmauerwerks wurden die Rampen zurückgebaut.

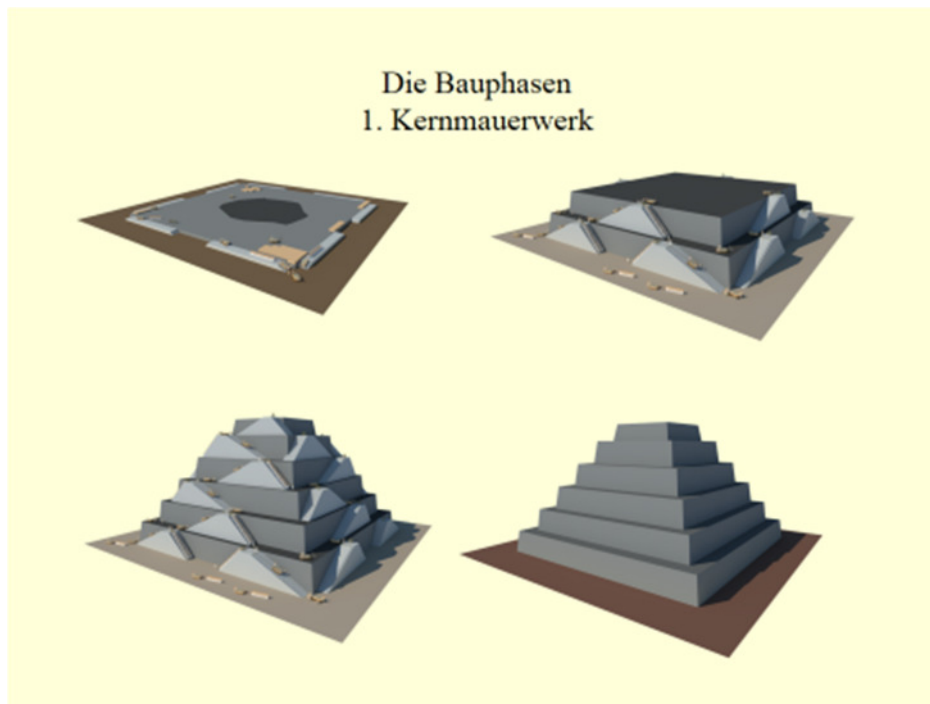


Bild 21

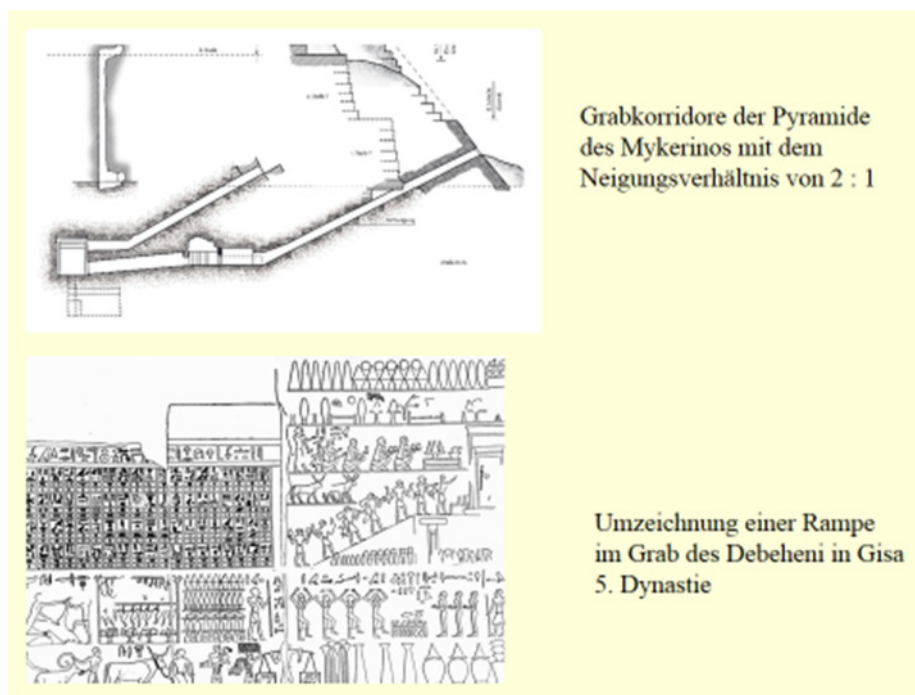


Bild 22

Steile Rampen mit einem Rücksprung von 1 (Höhe) zu 2 (Basis), welcher einem Winkel von  $26,5^\circ$  entspricht, sind im Alten Reich archäologisch vielfach belegt, so bei Eingängen zu Grabkammern von Pyramiden sowie in Abbildungen in Privatgräbern. Sie werden für die vorgeschlagenen Tangentialrampen daher als Stand der Technik angenommen (Bild 22).

Nach Fertigstellung des Kernmauerwerks werden dessen Rampen abgebaut. Dann erfolgt – ausgehend von der Basis der späteren Pyramidenverkleidung – der Bau der Außenverkleidung. Diese wird von stufenförmig angeordneten Umbauungen mit Rampen umgeben. Die Umbauungen lehnen sich an den hervorstehenden Steinen der noch nicht geglätteten späteren Außenverkleidung an. Das Pyramidion kann so gefahrlos über die Rampen bis zur obersten Plattform transportiert und dann waagrecht auf die Spitze der Außenverkleidung verschoben werden (Bild 23).

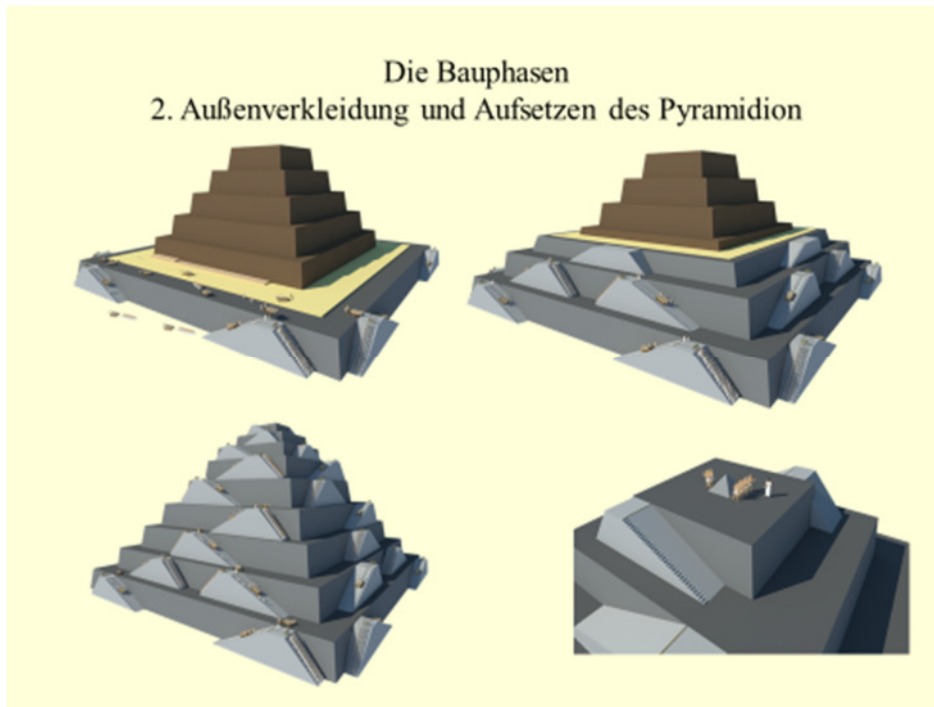


Bild 23

Die Frage, ob das Kernmauerwerk separat errichtet wurde oder ob die Bauphasen 1 und 2 gleichzeitig vorgenommen wurden, ist ungeklärt. Nach Untersuchungen des Autors vor Ort wurde beim Bau der Pyramide des Mykerinos das Verkleidungsmauerwerk an die Stufen des Kernmauerwerks mit Steinen unterschiedlicher Höhe angebaut. Dies spricht für zwei getrennte Bauphasen mit einem zeitlichen Mehraufwand für den Rückbau der Rampen.

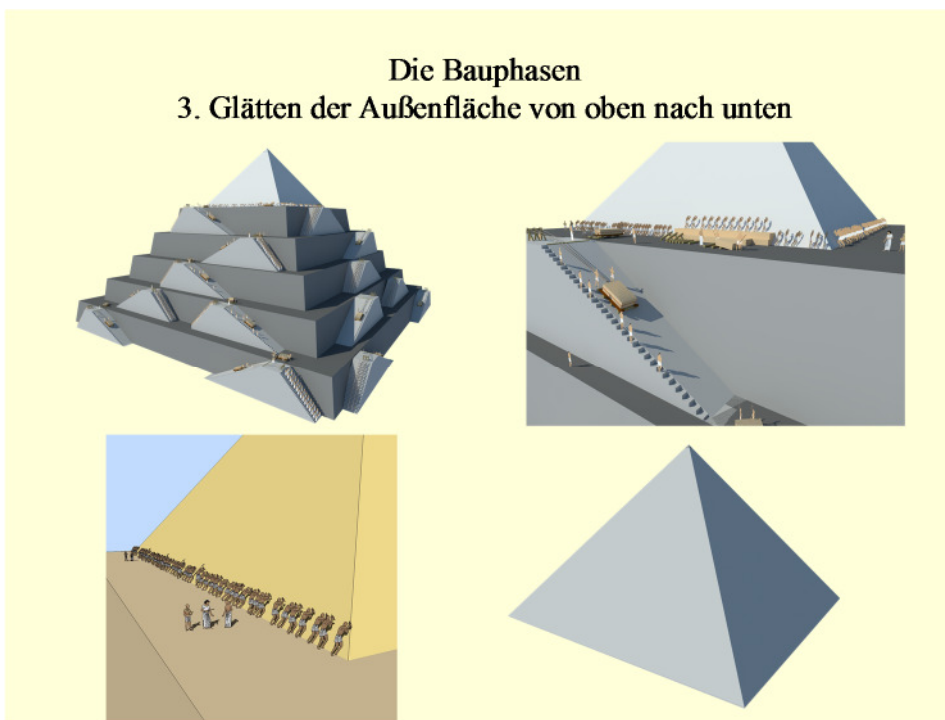


Bild 24

In der anschließenden dritten Bauphase werden dann die Außenrampen von oben nach unten abgebaut. Gleichzeitig erfolgt die Glättung der Außenfläche der Pyramide ohne Gefahr für die damit beschäftigten Arbeiter.

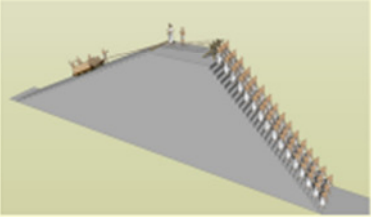


## Berechnung der Bauzeit

**Berechnung der Bauzeit**

Es müssen zwangsläufig gewisse Annahmen getroffen werden:

- Durchschnittliche Steingröße 1,2 m<sup>3</sup> (Gewicht 3 t)
- Gewicht pro Schleppvorgang 3,2 t
- **Taktzeit für einen Schleppvorgang 15 min (geschätzt)**



- Berücksichtigung der Zahl der Rampen je Stufe des Kernmauerwerks  
- Arbeitszeit 10 Stunden an 300 Tagen im Jahr  
- Arbeitszeit für Glätten der Außenseiten (Durch Versuche ermittelt)

Bild 25

Folgende Annahmen werden getroffen: Durchschnittliche Steingröße 1,2 m<sup>3</sup> (Gewicht 3 t) und Gewicht pro Schleppvorgang 3,2 t. Die Taktzeit für einen Schleppvorgang auf den Rampen (Bild 25) wird mit 15 min angesetzt und eine tägliche Arbeitszeit von 10 Stunden im Schichtbetrieb an 300 Tagen im Jahr angenommen.

Die bisher aufgrund von Überlegungen mit Bauingenieuren angesetzte Taktzeit von 15 min. konnte leider noch nicht verifiziert werden. Die tatsächliche Bauzeit der Pyramide wird jedoch von ihr maßgeblich bestimmt. Ein Antrag an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zur Finanzierung eines Praxisversuchs im Jahr 2014 wurde gestellt – leider jedoch abgelehnt.

Die Bauzeit für das Kernmauerwerk, das Verkleidungsmauerwerk und dessen Glättung, den Bau und Abbau der Rampen sowie für die Bauvorbereitungsmaßnahmen der Pyramide des Mykerinos beträgt nach dem geschilderten Verfahren ca. 4,8 Jahre (Bild 26).

Eine Vergleichsrechnung nach demselben Bauverfahren für die Pyramide des Cheops und die Rote Pyramide ergibt Bauzeiten von 22,5 bzw. 18,7 Jahren. Dabei wird der Baubeginn für die Rote Pyramide im 15. Jahr der Regentschaft des Snofru angenommen.

Die berechneten Bauzeiten der drei Pyramiden stehen daher nicht im Widerspruch zu den Regierungszeiten der Könige: Snofru 35 Jahre, Cheops 23 Jahre und Mykerinos - neuerdings 6 Jahre (nach Kauss und Warburton).

Die Bauzeit der Pyramide des Mykerinos beträgt nach dem  
geschilderten Verfahren

ca. 4,8 Jahre

Eine Vergleichsrechnung für die Bauzeiten der Cheops-  
pyramide und der Roten Pyramide ergibt

22,5 Jahre (Cheops) und 18,7 Jahre (Rote Pyramide)

Regierungszeiten der Könige	Mykerinos	28 bzw. 6 Jahre
	Snofru	35 Jahre
	Cheops	23 Jahre

Die ermittelten Bauzeiten stehen somit nicht im Widerspruch  
zu den genannten Regierungszeiten.

Bild 26

## Schlussbemerkung

Der Vorschlag für den Bau der Pyramiden im Alten Reich  
unter Verwendung von steilen Tangentialrampen und einer  
Umbauung wurde im Jahr 2008 veröffentlicht.

Ein wissenschaftlich fundierter Widerspruch wurde bisher  
nicht veröffentlicht.



Der Vorschlag für den Bau der Pyramiden im Alten Reich mittels Verwendung steiler  
Tangentialrampen und einer äußeren Umbauung wurde vom Autor erstmals im Jahr 2008  
veröffentlicht und seitdem in verschiedenen Publikationen wiederholt vorgestellt und erläutert.  
Ein wissenschaftlich fundierter Widerspruch wurde bisher nicht veröffentlicht.