

26. März 2001

Die Verwendung von Winkelhebeln beim Bau der grossen Pyramiden

Eine Machbarkeitsstudie von Alfred Hoehn

Auszug aus dem noch unveröffentlichten Buchmanuskript „warum und wie?“

"Mit magischen Schriftzeichen bedeckte Papyrusblätter legten sie auf die zurechtgehauenen Steinblöcke und gaben diesen einen Stoss. Dieser Stoss genügte, um die Blöcke bis zu 200 Pfeilschussweiten zu bewegen und fuhr man damit fort, so gelangten sie schliesslich auf das Pyramidenplateau....."

So beschrieb der arabische Schriftsteller Ahmed-al Maqrizi (1360-1442) in seinem Buch "Hitat" den bis heute ungeklärten Transport der Pyramidenblöcke vom Steinbruch bis zur Baustelle. Der fantasievolle Mann geht im Detail zwar nicht darauf ein, mit welchen Zeichen oder Sprüchen das Schweben der im Durchschnitt 2.5 Tonnen schweren Steine zustande kam und er erläutert auch nicht, ob das "Steineschweben" mittels solcher Magie auch in vertikaler Richtung zum Einbau der Blöcke in die Pyramide funktionierte.

Zu all den Strömen von Tinte, welche bezüglich der Bautechnik der grossen Pyramiden geflossen sind, sei hier noch ein kleines Rinnsal beigefügt, welches versuchen soll, das Rätsel des Hochhievens der Steine zu erklären.

Herodot deutete an, dass die Pyramiden mittels „Maschinen“ erbaut worden seien, wobei er aber weder Art und Weise, noch die Funktion dieser Maschinen näher beschreibt. Das Wort Maschine führte in der Folge zu gravierenden Irrtümern und Spekulationen, weil für den neuzeitlichen Menschen an einer Maschine bewegliche Teile, wie Räder, Rollen, Pleuel u.a.m. zu sein haben. Das ist aber wahrscheinlich grundlegend falsch interpretiert, weil das Wort Maschine in seiner griechischen Form für Hilfsmittel, Werkzeug und "Vorrichtung zur Uebertragung von Kräften" steht.

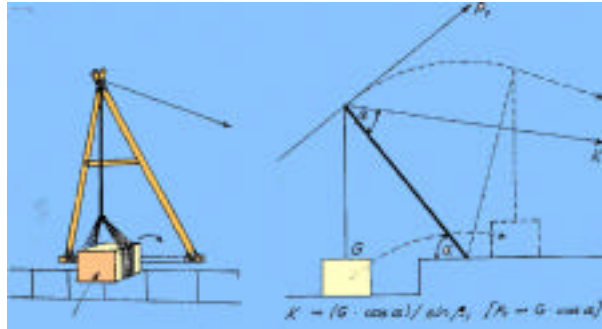
Ludwig Borchardt und andere Aegyptologen nehmen an, dass bei den Pyramiden bei Gizeh von der Sohle des Niltals bis zur Pyramide eine Rampe aus Schlammziegeln gebaut wurde, welche mit dem Bauwerk wachsen musste. Der Höhenunterschied vom Nilwasserspiegel bis zur Spitze der Cheopspyramide beträgt über 180 Meter. Bei Annahme einer Steigung von 5.5% ergibt sich eine Rampenlänge von ca 3'300 Meter. Egal, wie man den seitlichen Böschungswinkel dieser ungeheuren Rampe je nach verwendetem Material auch annimmt, so hätte dieses Bauwerk vom Volumen her ein Vielfaches der Pyramide selbst betragen. Man muss sich fragen, wer denn all diese Arbeit hätte ausführen sollen nebst dem ohnehin schon sehr intensiven Transport der Kalksteinblöcke für die Pyramide selbst. Ausserdem liegt völlig im Dunkeln, woher die ungeheure Masse von Material beschafft wurde und wohin sie wieder verschwunden ist. Maragiolio und Rinaldi, beide Aegyptologen und erfahrene Baufachleute verwerfen Borchardt's Theorie ganz klar.

Nun hat aber Borchardt an der Pyramide bei Medum offensichtlich Spuren eines Luftziegeldamms gefunden, welchen er als Transportweg deutete und auch als Theorie für die Cheopspyramide auslegte. Bei Medum würde sich aufgrund der Länge der Rampe eine Steigung von ca. 22° ergeben, was für eine

Treiderrampe mit Gewichten von über zwei Tonnen eindeutig zu steil ist. Aber gerade für diese Steigung kommt eine Hebetheorie in Frage, welche in gewissem Sinne auf die Maschinen Herodots zurück greift.

Am naheliegendsten wäre die Annahme eines Hebebocks in der Form eines gleichschenkligen Dreiecks ohne Rolle, welche letztere ja die Ägypter jener Zeit nicht gekannt haben (vgl. Figur 1).

Figur 1



Die am Zugseil bei K anzuwendende Kraft ist durch die Hebelwirkung gegenüber dem Gewicht G geringer. Doch die, die Kraft beeinflussenden Winkel α und β wirken sich ungünstig aus, je kleiner sie sind. Um einen Block mit 80 cm Höhe etwa einen Meter zu heben, muss der Winkel α ca. 50° betragen und um eine Mannschaft auf der Pyramidenstumpfläche nicht zu weit vom Hebebock entfernt plazieren zu müssen sollte der Winkel β nicht grösser als 45° sein. Diese Winkel betreffen die Situation am Anfang des Hebevorgangs, zu welchem Zeitpunkt auch die grössten Kräfte angewendet werden müssen. Die Länge der Schenkel des Hebebocks spielt theoretisch keine Rolle; sie wirkt sich bei fix angenommenen Winkeln lediglich auf die Transporthöhe aus. Um das genannte Gewicht einen Meter zu heben, sollte die Länge des Hebelarms ca 3.50 Meter betragen.

Um die Kraft K aus dem Gewicht G und den Winkeln α und β zu berechnen, dienen die Gleichungen:

$$P_f = G(\cos \alpha); \quad K = G(\cos \alpha / \sin \beta)$$

Bei Annahme eines Gewichts von 2500 kg und den oben genannten Winkeln erhält man:

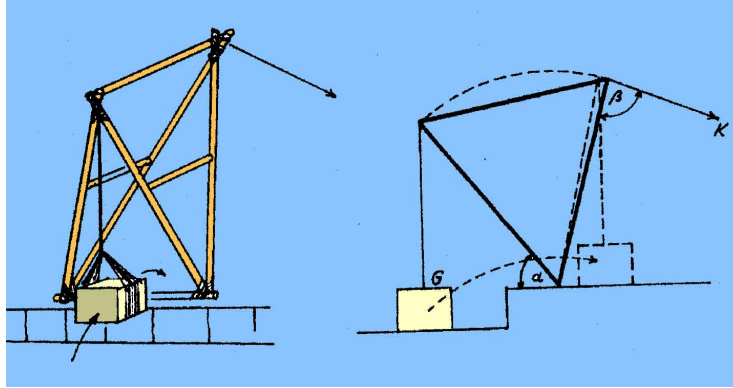
$$K = (2500 \times 0.643) / 0.707 = 2272 \text{ Kg}$$

Man sieht auf den ersten Blick, dass sich mit dieser Art von Hebebock die ganze Anstrengung nicht lohnt. Die schätzbaren 228 kg, die man damit einspart sind nicht der Rede wert und ausserdem müsste man am Zugseil bei einer Zugkraft pro Mann von 40 kg an die 57 Männer einsetzen. Aber genau dies ist der Punkt, worum es geht, denn die Schätzungen der Anzahl an den Pyramiden beschäftigten Leute sind meist zu hoch, insbesondere die von Herodot angegebene Zahl von 100'000 Mann.

Den Winkel α kann man kaum vergrössern, es sei denn man verlängere die Hebebockschenkel erheblich. Dann aber würde die "Maschine" unhandlich. Hingegen könnte man den Winkel β vergrössern, indem man den Hebebock etwas komplizierter gestaltet. Dazu erhält er die Form eines unregelmässigen

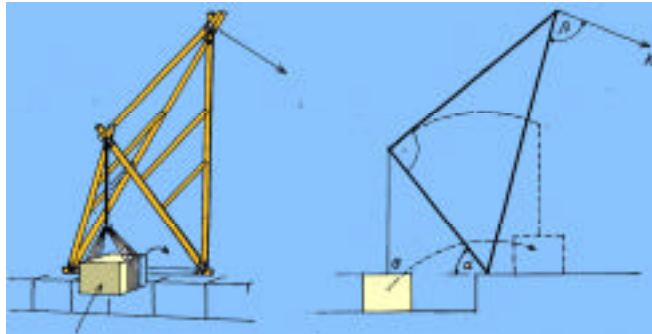
Tetraeders, bestehend aus je zwei gleichschenkligen und zwei weiteren gleichschenkligen oder anders gearteten Dreiecken (vgl. Figur 2). Das beste Resultat erzielt man bei Annahme von $\alpha = 90^\circ$.

Figur 2



Anstelle der beiden seitlichen gleichschenkligen Dreiecke könnten aber auch solche mit verschieden langen Schenkeln angenommen werden, vorzugsweise rechtwinklige und von diesen, wie könnte es anders sein z. B. das ägyptische mit den Seitenproportionen 3/4/5. Damit würde der Wirkungsgrad des Hebebocks nochmals optimiert (vgl. Figur 3). Aufgrund der verschiedenen Gewichte der in die Pyramiden verbauten Blöcke ist es durchaus denkbar, dass auch verschiedene Arten von Hebeböcken verwendet wurden. Für einen relativ kleinen Block z.B. in der Cheopspyramide von 0.60/0.70/0.70 m und demnach ca 750 kg Gewicht war nur ein kleiner Hebebock mit gleichschenkligen Dreiecken nötig, wogegen die grösseren Blöcke von 2'500-4'500 kg einen erheblich grösseren Hebel mit gleichschenkligen oder auch rechtwinkligen Dreiecken erforderten.

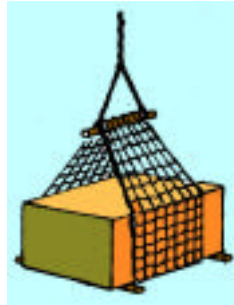
Figur 3



Bei den bis zu 40'000 kg schweren Deckenplatten der Königskammer und der Entlastungskammern musste allerdings auch diese Hebemethode versagen. Es ist deshalb fast als sicher anzunehmen, dass bis zur Verbauungshöhe dieser schweren Brocken, also für das erste Drittel der Gesamthöhe eine Treiderrampe mit geringem Gefälle benutzt worden ist.

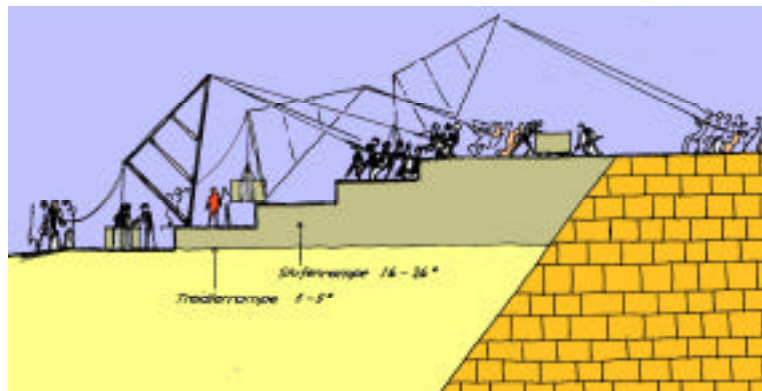
Als Zug- und Hebesaile verwendeten die Ägypter wahrscheinlich Palmfaserstricke, welche über eine erstaunliche Festigkeit verfügen. An den Blöcken verwendeten sie eine Art Tragtasche, welche ebenfalls aus Palmfaserstricken bestand (vgl. Figur 4).

Figur 4



Die Hebebocke selbst waren aus Holz, Palmholz, oder aus vom Libanon importierter Zeder. Der Holzverbrauch für diese Hebebocke war vergleichsweise gering, so dass man sich das teure Importholz leisten konnte. Im Prinzip hatte also der Hebebock die Form eines unregelmässigen Tetraeders in variierender Form, für den vier Hölzer zwischen 3 und 7 Meter Länge und ca. 20 cm Durchmesser gebraucht wurden. Als Verstreben konnten dünnere Hölzer verwendet werden. Der Arbeitsvorgang vollzog sich demnach etwa so, die Zugmannschaft und die "Gegenzieher" den Bock über dem zu hebenden Block in der Schwebe hielten, damit die Mannschaft am Block diesen am Seil befestigen konnte. War dies geschehen, so zog die Zugmannschaft so lange, bis der Block genau über dem Auflager des Blocks schwebte. Noch ein leichter Zug und dann senkte der Block sich mit steigender Geschwindigkeit, so dass hier die "Gegenzieher" in Aktion treten mussten, um eine unsanfte Landung zu vermeiden (vgl. Figur 5).

Figur 5



Wie man leicht erkennen kann, konnte man mit den Hebeböcken, welche nach der heutigen Nomenklatura als "Winkelhebel" bezeichnet werden, den Böschungswinkel einer Pyramide, sei er nun um die 43 Grad oder um die 52 Grad nicht erreicht werden, sondern höchstens ein solcher von ca 26 Grad. Dies bedeutet, dass die Aufschichtung der Blöcke nach einem ausgeklügelten System zu erfolgen hatte. Dies könnte z.B. daraus bestanden haben, dass auf die bis zu einer gewissen Höhe reichenden Treidlerrampe eine Stufenrampe aufgesetzt wurde, wobei letztere zum Teil aus Blöcken bestand, welche in der Pyramide verbaut und in der Rampe selbst stets wieder ersetzt wurden. Die jeweiligen Schichten der Pyramide wurden inklusive der bossierten Verkleidungsblöcke in die richtige Lage geschoben, worauf über die Stufenrampe die nächste "Welle" von Blöcken für die nächste Schicht geschafft wurden. Eine solche Methode hätte den Vorteil, dass die Mannschaften an den Hebeböcken stationär waren und sich deshalb voll und ganz auf den Vorgang des Hebens konzentrieren konnten.

Diese Hebemethode muss und kann nur im Zusammenhang mit der sogenannten Treidlermethode gesehen werden, denn es ist vernünftig anzunehmen, dass das untere Drittel der Pyramide mittels Treidlerrampen erschlossen wurde. Höchstwahrscheinlich wurde eine Kombination beider Methoden angewandt. So könnte man mit einer Treidlerrampe das Baumaterial bis auf eine gewisse Höhe schaffen. Von da an geht es mit den Hebeböcken und Stufenrampen weiter, welche letztere zum Teil aus behauenen Blöcken bestehen können, die im Bau wieder Verwendung finden. Die Hebeböcke würden es auch erlauben in der Mitte der obersten Plattform ständig um einige Stufen höher zu sein und ausserdem wäre es möglich, mit inneren Rampen zu arbeiten. Es war wohl weniger die Frage einer vollständigen, sozusagen mathematischen Vorausplanung des Bauvorgangs, als diejenige eines gesunden Menschenverstandes und empirischen Baugesfühls der verantwortlichen Leute, um mit dieser Mischmethode das bestmögliche Resultat heraus zu holen (vgl. Figur 6).

Figur 6



In der Folge werden die Treidler- und die Hebebockmethode physikalisch untersucht und einander gegenüber gestellt.

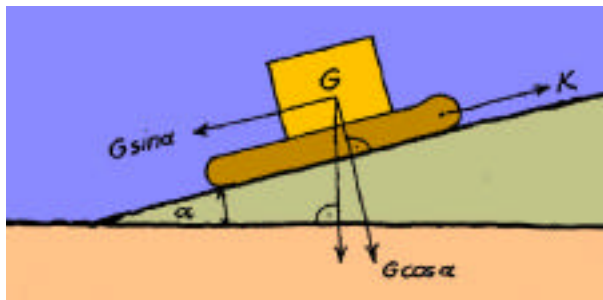
Treidlermethode

Diese von den meisten Aegyptologen befürwortete Methode des Schleiftransports grosser Gewichte ist sehr abhängig von der Steigung der Rampe und von der Reibungszahl μ (Reibungskoeffizient). L. Croon schlägt $\mu = 0.25$ vor, eine Reibungszahl, welche nur mit viel Holz und Wasser zu erreichen ist. Solche Massen von Holz und die ständige Durchnässung der Rampe aber sind nebst den Volumen der Treiderrampen exakt das Problem dieser Methode. Chevrier schlug sogar vor, einen noch viel kleineren Koeffizienten anzunehmen oder diesen gar im Vertrauen auf den ägyptischen Erfindergeist mit Null anzunehmen. Letzteres aber läuft im Endeffekt wieder auf die Steinschwebemethode von al Maqrizi hinaus, denn bei $\mu = 0$ würde der Steinblock in der Ebene ohne jeden Widerstand dahingleiten. Ein solches Unterfangen ist schon allein deshalb unmöglich, weil die sogenannte Reibungskraft zwei Reibungsarten beinhaltet, nämlich Haft- und Gleitreibung. Die Haftreibung tritt beim still auf seiner Unterlage liegenden Körper auf, wenn er in Bewegung gesetzt werden soll. Die Gleitreibung tritt beim sich bereits in Bewegung befindlichen Körper auf und ist bedeutend geringer, als die Haftreibung. Die Berechnung der Zugkraft K erfolgt durch die Formel

$$K = (\mu \cdot G \cdot \cos \alpha) + (G \cdot \sin \alpha)$$

wobei μ die Reibungszahl (Reibungskoeffizient), G die Gesamtlast und α den Steigungswinkel bedeutet (vgl. Figur 7)

Figur 7



Das Gewicht der Gesamtlast dürfte bei einem Volumen des Kalksteinblocks von 1 m³ und einem spezifischen Gewicht von 2.5, zusätzlich Schlitten und Seilwerk 3000 kg und mehr betragen haben. Für die Festlegung der Reibungszahl μ dienen einschlägige Tabellen (z.B. Holz auf Holz, Stein auf Holz, Metall auf Stein usw), wobei die Angaben aber nicht sehr zuverlässig sind und sich von Buch zu Buch unterscheiden. Die folgenden Tabellen zeigen den Kraftaufwand und Mannbedarf für einen Brocken von 3000 kg plus Schlitten von 300 kg mit verschiedenen Reibungskoeffizienten. Die Annahme des Koeffizienten 0.5 beim Starten ist unerlässlich und eine Herabsetzung wäre Selbstbetrug. Beim Gleiten sind die Koeffizienten flexibler, aber bereits 0.25 kann nur mit Mühe und viel Wasser erreicht werden (vgl. die folgenden Tabellen).

Tabelle 1 **Beispiel mit Haftreibung**

Reibungskoeff	Gewicht	Winkel in Grad	Steigung	Zugkraft	Männer
μ	G		%	K	15kg
0.5	3300	3.00	5.24	1820.45	121
0.5	3300	6.00	10.51	1985.91	132
0.5	3300	9.00	15.84	2145.92	143
0.5	3300	12.00	21.26	2300.05	153
0.5	3300	15.00	26.79	2447.88	163
0.5	3300	18.00	32.49	2589.00	173
0.5	3300	21.00	38.39	2723.02	182

Tabelle 2 **Beispiel mit Gleitreibung**

Reibungskoeff	Gewicht	Winkel in Grad	Steigung	Zugkraft	Männer
μ	G		%	K	15kg
0.25	3300	3.00	5.24	996.58	66
0.25	3300	6.00	10.51	1165.42	78
0.25	3300	9.00	15.84	1331.08	89
0.25	3300	12.00	21.26	1493.08	100
0.25	3300	15.00	26.79	1650.99	110
0.25	3300	18.00	32.49	1804.38	120
0.25	3300	21.00	38.39	1952.82	130

Tabelle 3 **Beispiel mit geringer Gleitreibung**

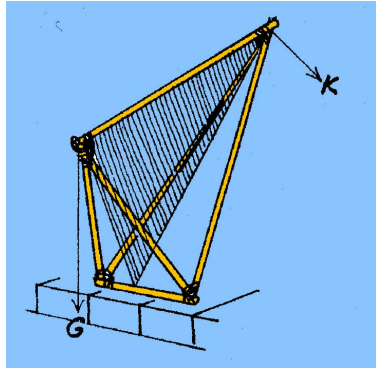
Reibungskoeff	Gewicht	Winkel in Grad	Steigung	Zugkraft	Männer
μ	G		%	K	15kg
0.15	3300	3.00	5.24	667.03	44
0.15	3300	6.00	10.51	837.23	56
0.15	3300	9.00	15.84	1005.14	67
0.15	3300	12.00	21.26	1170.29	78
0.15	3300	15.00	26.79	1332.24	89
0.15	3300	18.00	32.49	1490.53	99
0.15	3300	21.00	38.39	1644.74	110

Bei diesen Tabellen kann man sofort erkennen, dass Rampensteigungen von 20° gerade nur noch mit dem geringsten Reibungskoeffizienten von 0.15 vom Personal her noch denkbar sind. Von 40°, wie von manchen Autoren angenommen, kann gar keine Rede sein. Bei der Annahme eines Haftreibungskoeffizienten von 0.5, was keineswegs abwegig ist, müssen bei einer Mannleistung von 15 kg und für eine Steigung von 6° gar 132 Mann angenommen werden. Dies scheint nun doch etwas zu vorsichtig berechnet, denn es ist doch einem gesunden Mann für kurze Zeit eine erheblich grössere Zugkraft zu zumuten. Wie auch immer und mit welchem Kraftaufwand eine Mannschaft einen Stein vom Stillstand ins Gleiten brachte, eines war bestimmt verpönt, nämlich Stillstehen und Pausemachen. Bei jeder Unterbrechung des Gleitens musste der Kraftaufwand zur Ueberwindung der Haftreibung wiederholt werden. Die von Borchardt beschriebene Rampe bei Meidum soll eine Steigung von 22° gehabt haben. Zum Starten eines 3000 kg Tara-Brockens wären über 180 Mann nötig gewesen und dies bei der optimistischen Annahme des Haftreibungskoeffizienten von 0.5. Auch bei Annahme einer grösseren Zugkraft pro Mann zum Zeitpunkt des Starts wäre die Zahl der Mannschaft einfach zu gross, um eine vernünftige Abwicklung des Bauprozesses zu gewährleisten.

Hebebockmethode

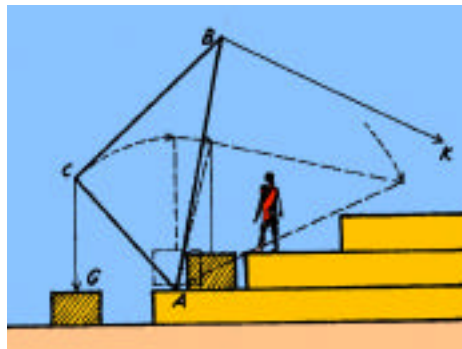
Bei den bereits beschriebenen Hebeböcken handelt es sich aus naturwissenschaftlicher Schau um sogenannte mathematische Hebel mit zwei auf diesen wirkenden Kräften und einem festen Drehpunkt. Bei den Dreiecken, welche im Zusammenhang mit diesen Hebeböcken genannt werden, handelt es sich um Wirkungsdreiecke, welche in einer Symmetrieebene des aus dem Gerät gebildeten Tetraeders liegen (vgl. Figur 8).

Figur 8



Ein Dreieck, welches sich kraftmässig und geometrisch besonders gut für den Hebebock eignet ist dasjenige mit den Seitenproportionen $3/4/5$, welches bekanntlich rechtwinklig und bis zum heutigen Tag jedem Maurerlehrling ein geläufiges Messwerkzeug geblieben ist. Aus Figur 9 ist die Wirkungsweise dieses Hebels ersichtlich. A ist der Drehpunkt, G das aufzuziehende Gewicht und K der dazu nötige Kraftaufwand. Es ist ganz klar, dass K am Beginn des Hebevorgangs am grössten und dann, wenn das Gewicht sich senkrecht über A befindet gleich Null ist.

Figur 9



In dieser Form eines unregelmässigen Tetraeders kann der Hebebock relativ klein gestaltet werden. Für die Ueberwindung von Stufen mit ca 80-90 cm Höhe kann ein Hebel dreieck mit Seitenlängen von 6 Ellen, 8 Ellen und 10 Ellen zu je 52.3 cm angenommen werden. Für höhere Stufen oder Hebel, welche zwei Stufen überwinden sollen, sind grösse Hebeböcke mit gleichen Proportionen zu verwenden. In dem in Figur 10 dargestellten Schema eines tetraedrischen

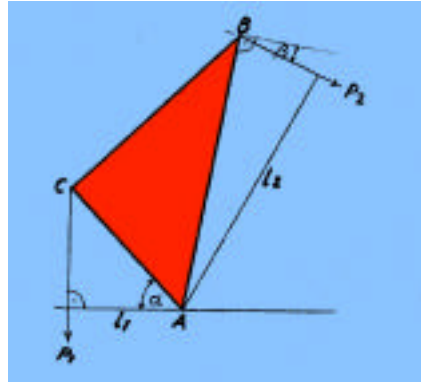
Winkelhebels wurde von einer Stufenhöhe von 80 cm Höhe und einem Böschungswinkel von ca 26° ausgegangen. Die Last ist ein Kalksteinquader mit den Kantenmassen 110x120x90 cm und mit dem Volumen von 1.2 m³ und demnach einem Gewicht von 3'000 kg.

Das Dreieck ist also als starrer Hebel mit der Ecke A als Drehpunkt, auf welchen an den Punkten B und C die Kräfte P_1 und P_2 in Richtung der Pfeile wirken. Um den Hebel im Gleichgewicht zu halten, gilt:

$$P_1 \cdot l_1 = P_2 \cdot l_2$$

wobei l_1 respektive l_2 die Abstände des Drehpunktes, senkrecht auf die Wirkungslinien der Kräfte gemessen, sind. Tatsache ist ebenfalls, dass die Kraft P_1 , also der Steinblock senkrecht zur Erdoberfläche wirkt.

Figur 10



l_1 und l_2 können aus den Winkeln α und β , sowie den Dreiecksseiten AB und AC trigonometrisch berechnet werden:

$$l_1 = AC(\cos \alpha); l_2 = AB(\cos \beta)$$

Durch Umformung der Gleichgewichtsformel ergibt sich:

$$P_2 = P_1 (AC(\cos \alpha) / AB (\cos \beta));$$

Beispiel: $P_1 = 3000 \text{ kg}; \alpha = 50^\circ; \beta = 0^\circ; AC = 3.13 \text{ m (6 Ellen)}; AB = 6.27 \text{ m (12 Ellen)}$.

$$P_2 = 3000 \times 3.13 \times 0.643 / 1 \times 6.27 = \mathbf{964 \text{ kg}}$$

Um also das Gewicht von 3000 kg durch Zug an einem Seil bei B in Richtung P_2 um eine Stufe von ca 80 - 90 cm zu heben, ist ein anfänglicher Kraftaufwand von 964 kg erforderlich. Wie schon erwähnt, handelt es sich hier, im Gegensatz zur Treidlermethode, um einen kurz dauernden Kraftaufwand, welcher mit dem Hub der Last rasch abnimmt und bei senkrechter Stellung des Hebelarms AC null erreicht. Ab dieser Stellung wirkt bis zum Aufsetzen der Last eine Gegenkraft, welche durch Gegenzug an einem Seil bei C oder Zurückstossen der Zugmannschaft bei B zu neutralisieren war. Bei der Treidlermethode wurde ein Kraftaufwand von 15 kg pro Mann angenommen, da es sich um eine Dauerleistung handelt. Um also den 3000 kg schweren

Schlitten auf der Rampe mit 3° Steigung zu starten, wären 121 Mann nötig gewesen. Wie aus der nachstehende Tabelle ersichtlich, braucht es aber nur 20 Mann, um mit einen anfangs grösseren Kraftaufwand (48 kg pro Mann) mittels der Hebebockmethode einen 3000 kg schweren Block eine Stufe hoch zu ziehen.

Berechnung der Zugkraft durch Winkelhebel (gleichschenliges Dreieck)

		Anzahl Männer		10.00	
Gewicht	AC	AB	Winkel	Zugkraft	pro Mann
kg	Ellen	Ellen	Grad	kg	kg
750.00	5.00	6.00	45.00	444.38	44
750.00	5.00	6.00	50.00	403.96	40
750.00	5.00	6.00	55.00	360.46	36
750.00	5.00	6.00	60.00	314.22	31
750.00	5.00	6.00	65.00	265.59	27
750.00	5.00	6.00	70.00	214.94	21
750.00	5.00	6.00	75.00	162.65	16
750.00	5.00	6.00	80.00	109.13	11
750.00	5.00	6.00	85.00	54.77	5

Berechnung der Zugkraft durch Winkelhebel (Dreieck 3/4/5)

		Anzahl Männer		18.00	
Gewicht	AC	AB	Winkel	Zugkraft	pro Mann
kg	Ellen	Ellen	Grad	kg	kg
2000.00	6.00	10.00	48.00	803.08	45
2000.00	6.00	10.00	53.00	722.29	40
2000.00	6.00	10.00	58.00	636.00	35
2000.00	6.00	10.00	63.00	544.87	30
2000.00	6.00	10.00	68.00	449.60	1
2000.00	6.00	10.00	73.00	350.90	19
2000.00	6.00	10.00	78.00	249.53	14
2000.00	6.00	10.00	83.00	146.27	8
2000.00	6.00	10.00	88.00	41.89	2

Berechnung der Zugkraft durch Winkelhebel (Dreieck 1/2)

		Anzahl Männer		20.00	
Gewicht	AC	AB	Winkel	Zugkraft	pro Mann
kg	Ellen	Ellen	Grad	kg	kg
3000.00	6.00	12.00	50.00	964.33	48
3000.00	6.00	12.00	55.00	860.50	43
3000.00	6.00	12.00	60.00	750.12	38
3000.00	6.00	12.00	65.00	634.03	32
3000.00	6.00	12.00	70.00	513.11	26
3000.00	6.00	12.00	75.00	388.29	19
3000.00	6.00	12.00	80.00	260.51	13
3000.00	6.00	12.00	85.00	130.76	7

Berechnung der Zugkraft durch Winkelhebel (Dreieck 3/7)

		Anzahl Männer		24.00	
Gewicht	AC	AB	Winkel	Zugkraft	pro Mann
kg	Ellen	Ellen	Grad	kg	kg
4500.00	6.00	14.00	53.00	1'160.82	48
4500.00	6.00	14.00	58.00	1'022.14	43
4500.00	6.00	14.00	63.00	875.69	36
4500.00	6.00	14.00	68.00	722.57	30
4500.00	6.00	14.00	73.00	563.95	23
4500.00	6.00	14.00	78.00	401.04	17
4500.00	6.00	14.00	83.00	235.07	10
4500.00	6.00	14.00	88.00	67.32	3

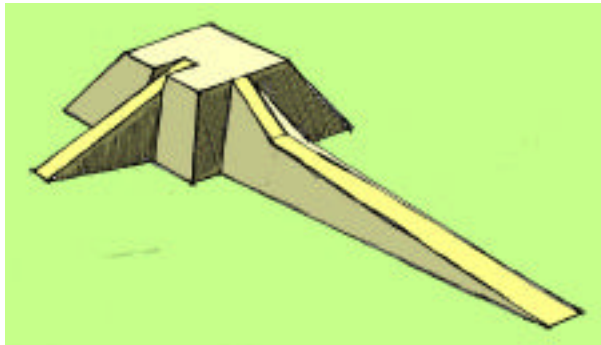
Dazu kommen allerdings noch die Gegenzieher und die Männer am Stein. Die folgenden Tabellen geben einen Ueberblick über die verschiedenen Möglichkeiten beim Gebrauch von Winkelhebeln. Die Masse der Hebelseiten sind in ägyptischen Ellen (1 Elle = 52.3 cm) angenommen.

Das Gewicht von 4500 kg muss aber über Stufen von höchstens 60 cm gehoben werden, so dass für diese Gewichtsklasse eine spezielle Rampe benützt wurde. Aus derTabelle ist ersichtlich, dass ein 4.5 Tonnen schwerer Brocken mit einem geeigneten Gerät und mit 24 starken Männern über die Stufen transportiert werden kann.

Diese Winkelhebel-Methode erlaubt ein ausserordentlich flexibles System durch Wahl der Hebelarmproportionen, Hebelarmlängen, Ansatzwinkeln, Hebehöhen, Aufstellung des Hebebocks u.a.m. Der Fantasie und Geschicklichkeit der Bauleute sind mit diesem Werkzeug fast keine Grenzen gesetzt.

Bei den bis zu 50'000 kg schweren Deckenplatten der Königskammer und der Entlastungskammern musste allerdings auch diese Hebemethode versagen. Es ist deshalb fast als sicher anzunehmen, dass bis zur Verbauungshöhe dieser schweren Brocken eine spezielle, ev. steilere Treidlerrampe diente, auf welcher die Lasten mittels zahlreicher Seile (?) und auf der gegenüberliegenden Pyramidenseite herabgleitenden Gegenlasten, sozusagen im Finiculair-System heraufgezogen wurden. Figur 11 zeigt eine Pyramide auf ca einem Drittel Bauhöhe mit links einer steilen Treidlerrampe für ganz schwere Lasten im Gegengewichtssystem und rechts eine normale Treidlerrampe mit aufgesetzter Stufenrampe für den Winkelhebeltransport.

Figur 11



Die Neigungen der verschiedenen Rampen im Bezug auf die Gewichte und auf die unterschiedlich dicken Verlegeschieden bei der Cheopspyramide, sowie eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Winkelhebelarten ist Thema eines besonderen Aufsatzes, der bald auf dieser Website erscheinen wird.