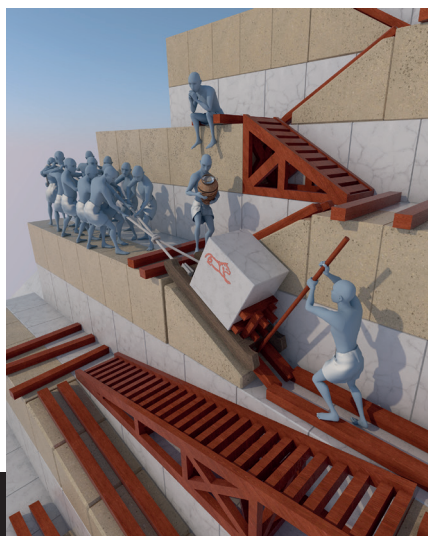




A gízai nagy piramis belső szerkezeti kialakításának elméleti megközelítése

A theoretical approach to the internal structure of the Great Pyramid of Giza



Szabó Péter

okl. építészmérnök, PhD,
egy. docens, Soproni Egyetem,
Faipari Mérnöki és Kreatívipari
Kar, Kreatívipari Intézet, e-mail:
szabo.peter@uni-sopron.hu

Építészmérnök, egyetemi oktató és tervező. Tervezői munkájában kiemelt szerepet kap a fa mint építőanyag; több faszervezetű kilátót, valamint lakó- és középületet tervezett. Szakmai érdeklődésének középpontjában a fenntartható anyaghasználat, a megújuló energiák alkalmazása és a nyári túlmelegedés csökkentésének passzív épületfizikai megoldásai állnak. Doktori kutatását is ezen a területen végezte. Egyetemi oktatóként és kutatóként foglalkozott az árnyékolók geometriájával, az akác szerkezeti alkalmazhatóságával, az akadálymentesítés tervezési kérdéseivel. Kutatási és tananyagfejlesztési tevékenységének fontos területe az építéstechnika története, különös tekintettel az ókori építési folyamatok mérnöki szemléletű értelmezésére és digitális rekonstrukciójára, valamint a digitális szemléltetés és a kompetenciaalapú tudásátadás lehetőségeire.

Kivonat / Hun

A gízai nagy piramis belső felépítése az ókori Egyiptom mérnöki és építészeti zsenialitásának kiemelkedő példája. A cikk célja, hogy a legfrissebb régészeti és mérnöki kutatások eredményeire támaszkodva rekonstruálja a piramis szerkezeti kialakítását és építési folyamatát. A tanulmány részletesen elemzi a belső terek – köztük a sírkamrák, folyosók és teherelosztó rendszerek – funkcionális szerepét és szerkezeti jellemzőit, valamint bemutatja azok fejlődési előzményeit a korábbi piramisok tükrében. Kiemelt figyelmet fordít a nyereggerendák és a gránit teherelosztó kamrák építési technikáira, amelyek a korabeli innovációt tükrözik. Az elemzés során külön hangsúlyt kap a piramisépítés során alkalmazott anyaghasználat, szerkezeti megoldások és munkaerő-szervezési stratégiák. Az eredmények nemcsak a nagy piramis belső felépítésének megértését mélyítik el, hanem hozzájárulnak az ókori építészet technológiai és kulturális hátterének jobb megértéséhez is. A tanulmány újabb nézőpontokat kínál a piramisépítés mérnöki és régészeti megközelítéseire, miközben felhívja a figyelmet a további kutatási lehetőségekre.

Kulcsszavak: Egyiptom, piramis, Kheopsz, ókor, sírkamra, nyereggerenda, piramisépítés

Abstract / Eng

The interior of the Great Pyramid of Giza is an outstanding example of the engineering and architectural genius of ancient Egypt. The aim of this article is to reconstruct the structural design and construction process of the pyramid based on the latest archaeological and engineering research. The study analyses in detail the functional role and structural characteristics of the interior spaces, including the tomb chambers, corridors and load-distribution systems, and presents their evolutionary history in the light of earlier pyramids. It pays particular attention to the construction techniques of saddle beams and granite load-bearing chambers, which reflect contemporary innovation. Special emphasis is given to the use of materials, structural solutions and labour management strategies used in pyramid construction. The results will not only deepen our understanding of the internal construction of the Great Pyramid, but will also contribute to a better understanding of the technological and cultural context of ancient architecture. The study offers new perspectives on engineering and archaeological approaches to pyramid construction, while drawing attention to further research opportunities.

Keywords: Egypt, pyramid, Cheops, antiquity, tomb, beam, pyramid construction

Lektorált tartalom

1. | Szerkezeti előzmények, szerkezetfejlesztés

Kheopsz piramisa nemcsak a legnagyobb a piramisok között, hanem a belső felépítése is teljesen egyedi. Ilyen bonyolultságú kialakítással sem a korábbi, sem a későbbi sírhelyek nem rendelkeznek. A sírkamrák és folyosók funkcióiról és sorrendiségéről még ma is vitáznak a szakemberek. Ezeket a vitákat tudományosan lezárni nagyon nehéz, csak adalékokat próbálunk nyújtani a további kutatásokhoz.

A nagy piramis belső felépítése sok ponton eltér a 4500 évvel ezelőtti állapotától. A sírrablók, kalandorok és a régészek maguk is sok ponton átalakították az „eredeti tervet”. A sírkamrákban „feltáró” alagutakat ástak, köveket, burkolatokat távolítottak el, de a javítás és a „turistabarát” átalakítások is megnehezítik a tudományos vizsgálatokat. Ennek ellenére a modern vizsgálati eredményeknek köszönhetően még napjainkban is új felfedezések születnek. Az eredeti bejárat felett „nagy üreg”-nek (1. és 3. ábra) keresztelt 9 méter hosszú, mészkő, nyereggerendákkal fedett járatot tártak fel 2023-ban [1].

1.1. Dzsószer piramisa

Nagyon nehéz megmondani, hogy a piramis kialakítása egy egységes terv alapján készült, vagy fokozatosan módosították a koncepciót. A korábban épült sírok, sírkamrák formáiból lehet következtetni a változások irányára, de egyértelmű következtetéseket levonni nem lehet.

A korai temetkezések gyakran csak egy fedett gödröt jelentettek, később az uralkodó „sír formává” a masztaba (pad) vált. Az első kőből épült, több egymásra épített „masztabából” álló lépcsős piramist Dzsószer fáraó építtette. Ezt a piramist többször bővítették és több dinasztia tárgyait is elhelyezték benne. Több mint 40 000 kőedényt találtak az elágazó földalatti járatokban.

Ennek a piramisnak a ma látogatható része nagyon félrevezető képet mutat. Meg lehet csodálni egy 7 méter széles és 28 méter magas „kamrát”, és

egy több darabból álló gránit szarkofagot. Ilyen méretű sírkamrát az ókorban nem építettek. Az eredeti egyetlen lépcsőből álló masztaba függőleges aknáját a temetés során feltöltötték, miután a fáraó földi maradványait a gránit „szarkofágba” helyezték. A földalatti járatokhoz más aknákon lehetett hozzáférni. Ma ez a kitisztított akna látható – mint sírkamra – a tetején, egy a mészkő kövek alkotta természetes boltozattal. Ezt a sírt is többször kirabolták (kitisztították) és a kövek természetes átboltozódását fa gerendákkal megtámasztották [2].

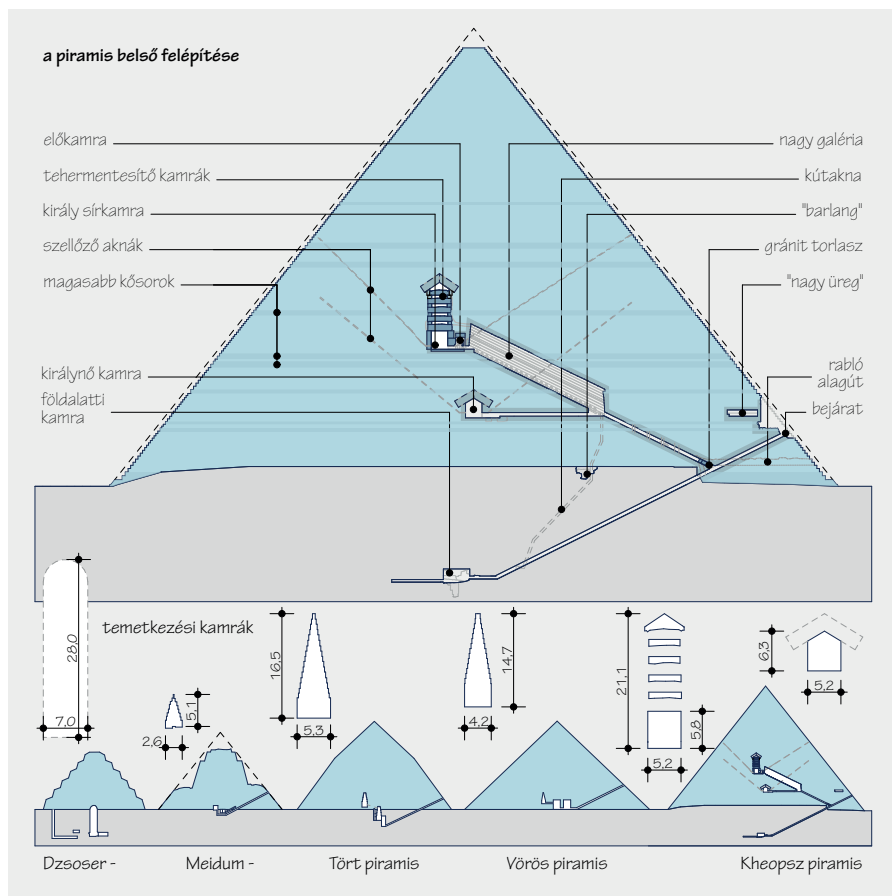
Statikai szempontból egy ilyen szerkezet felépítése, ha Imhotep építész-ként nem volt felelőtlen, csak úgy képzelhető el, ha a befejezett, egyszintes masztabára építették rá a többi lépcsőt. Erre azonban csak a fáraó temetése után kerülhetett sor. Persze az is elképzelhető, hogy pont ez a kockázatos boltozat kialakítás volt az oka a későbbi nagyon biztonságos statikai „terveknek”.

Építészeti szempontból ez azt jelenti, hogy a piramis lépcsőinek az építésére már csak a temetés után kerülhetett sor. Mivel a piramis alatti alagutakban a korábbi dinasztiából származó edényeket találtak, feltételezhető, hogy a sír-együttest hosszú ideig használták szent helyként, amibe akár a későbbi bővítések is beleférhetnek.

Az oszlop alátámasztású bejárat folyosó is évezredekkel később készült, amikor javításokat is végeztek a szerkezeten. A lépcsős piramis ma megtekinthető belső kialakítása építészeti szempontból nagyon félrevezető, nem tekinthető a nagy piramis szerkezeti előzményének.

1.2. Korai piramis maradványok

A piramisok következő generációjáról nagyon keveset tudunk. A talán Khaba fáraóhoz köthető „réteges” piramis, és Sekhemkhet „eltemetett”



1. ábra: A piramisokban található sírkamrák elhelyezkedése

piramisa csak romokban maradt fenn [2. ábra]. A kutatók abban sem biztosak, hogy ezek a piramisok teljesen felépültek vagy esetleg félbehagyták azokat [3].

Szerkezeti felépítésükből azonban pár dolog nyilvánvaló. Réteges falrendszereket építettek, pontosan megmunkált kősorokat kitöltve szabálytalanabb kövekkel. A sírkamrát pedig a piramis alá a mészkőbe vágták egy külső a piramis mellől induló járattal. A piramist ezeken a külső járatokon megközelíthető, földalatti folyosók és kamrák szegélyezik. Ez a kialakítás lehetővé tette, hogy a már teljesen elkészült piramis alá tudják temetni a fáraókat.

A réteges felépítés és a szabálytalan „kitöltő” kövek használata a későbbi piramisoknál is megfigyelhető. A kősorok befelé dőlnek, ami azt jelenti, hogy a piramis rétegeit belülről kifelé építették. Először a belső „mag” épült meg, amit hagymahéj szerűen bővítettek, végül a burkolatot helyezték el. A kövek kisebb méretűek, ami több lehetséges építési technikát is lehetővé tett.

A sírkamrák és az azokhoz vezető alagutak a mészkő alapba lettek bevágtva, így statikailag nem kellett foglalkozni a kamrák „lefedésével”.

1.3. Sznofru piramisai

Az időrendben soron következő három piramis feltehetően Sznofru fáraóhoz köthető. A meidum-, tört- és vörös piramis belső felépítése [1. ábra] a rokon vonások mellett komoly eltéréseket is tartalmaz. Egyik sem nyúlik mélyen az alapkőzetbe és a kamrák álboltozatos technikával épültek, egymáshoz közel eső kamra rendszereket alkotva.

A Meidum piramis dőlésszöge: $51^{\circ}50'$ és egy 2,6 méter széles és 5,1 méter magas álboltozatos sírkamrát tartalmaz. A kiszélesedő folyosói és a lefelé ereszkedő járat alsó része álboltozatos tehermentesítő kamrákat tartalmaz. Ebben a piramisban volt a legóvatosabb a „statikus” a belső kialakítás tekintetében, és mégis ez maradt fenn a legromosabb állapotban. Ennél a piramissnál sem tértek el a réteges felépítéstől, és az egyes kősorok [a korábbi építéshez hasonlóan] nem

vízszintesek, hanem befelé dőlnek. Ez a kialakítás csak a belülről kifelé történő építkezést teszi lehetővé.

A tört piramis alsó felének dőlésszöge meredekebb, a felső fele már kisebb hajlásszögű, ami megegyezik a vörös piramiséval. Ebben a két piramisban nem ismerünk tehermentesítő kamrákat és az álboltozatos sírkamrák 5,3 és 4,2 méter szélesek. A vörös piramis nem tartalmaz a mészkőbe vágott járatokat vagy kamrákat.

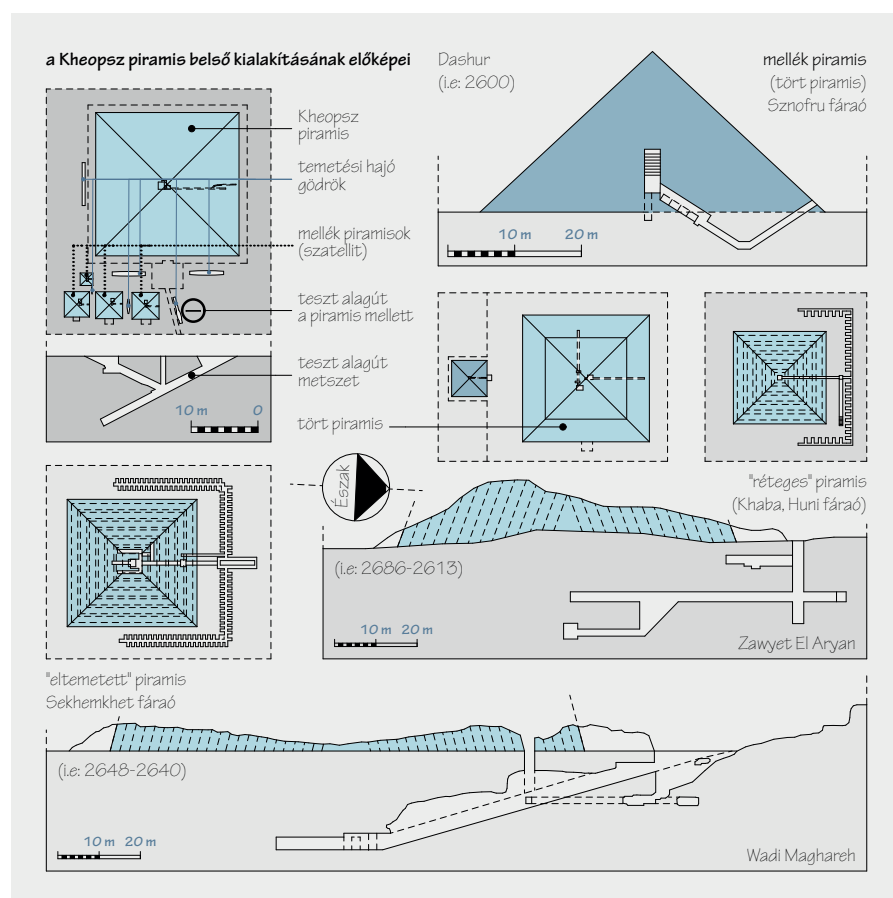
A piramis oldalából induló lefelé vezető járatok és az álboltozatos kamrák kialakítása piramisonként jelenthet technikai előrelépést, azonban nem ezek a Kheopsz piramis közvetlen előzményei.

1.4. Közvetlen előképek

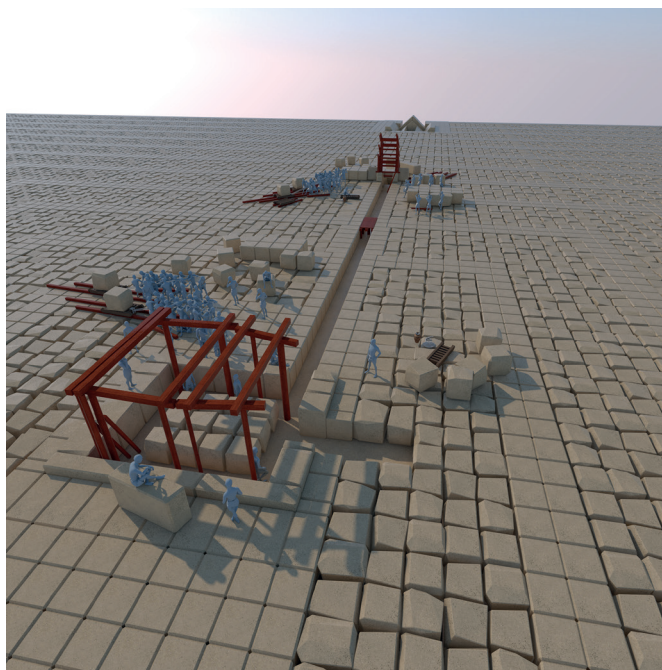
Sznofru fáraó tört falú sírépítménye melletti mellék piramisában találkozhattunk először egy felfelé vezető folyosóval és az azon lecsúszó gránit

torlaszok ötletével [3. ábra]. Ez korban közvetlenül a nagy piramis előtt épülhetett, igaz ebben a szatelit piramisban a tervezett „védelmi” rendszer nem működött tökéletesen, hiszen nem minden gránitdugó csúszott le. Azt, hogy erről tudtak-e az építők, és azért döntöttek úgy, hogy Kheopsz nagy galériájában nyomon követhető módon indítsák el ezeket a torlaszokat, menekülési útvonalként használva a kútaknát [1. ábra], nem tudjuk. Arról azonban tudunk, hogy ennek a rendszernek a vizsgálatára megépítettek egy „teszt” aknát a nagy piramis keleti területén [4. ábra].

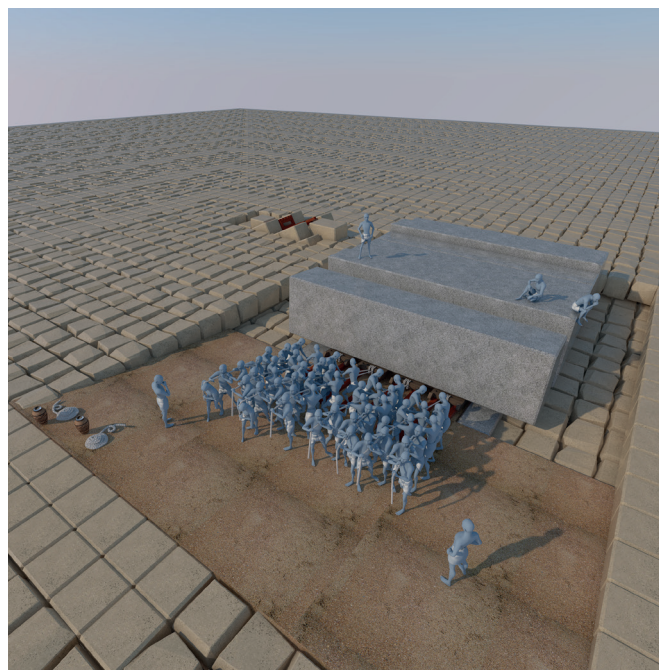
Ez a próba alagút méretében és dőlésszögében is megegyezik a „végleges” folyosó csatlakozási kialakításával. Az alagút tesztelése bebizonyíthatta, hogy a zárókövek mechanizmusa megfelelően fog működni. Ez az előzetes modell lehetőséget teremthetett arra is, hogy meghatározzák azoknak a temetkezési tárgyaknak a méreteit, amik „átférnek” a járat töréspontján.



2. ábra: Korai sírkamra kialakítások



3. ábra: A királynő kamra szintbeli elhelyezkedése, mellékkárok kialakításával



4. ábra: A király kamra gránit fedőköveinek elhelyezése

2. | A nagy piramis belső felépítése

Az összes piramis közül a nagy piramis rendelkezik a legösszetettebb belső felépítéssel. A felhasznált építési technikák közül soknak megtalálhatjuk az előképét a korábbi sírkamrákban, de sok olyan megoldással is találkozhatunk, amelyek ennél az építménynél jelennek meg először [1. ábra].

2.1. Földalatti sírkamra

A földalatti sírkamra teljesen a mészkőbe vágva készült és nincsen befejezve [4]. Ez a befejezetlenség sok kérdést vet fel a kutatók körében a kamrák építési sorrendjével kapcsolatban. Sok kutató feltételezte, hogy a félkész állapot félrevezetés, és innen egy rejtett kamra nyílhat. A kincsvadászok ezért néhány „feltáró” járatot ástak, de nem bukkantak rejtett kamrára vagy kincsre.

Ez a sírkamra szerkezetében a Dzsó-szer fáraót követő romos piramisokkal van rokonságban. Elképzelhető, hogy itt állt már egy régebbi masztaba vagy egy elkezdett piramis. Ez megmagyarázza a kútakna felső részén található „barlang” kialakítását, hiszen ez akkor

a mészkkő felszínén volt. Nem bizonyítható, de a legnagyobb piramis is egy meglévő sír „újrahasznosításával” kezdődhetett.

A kamra két részből áll, egy 6 méter széles befejezett és egy 8 méteres félkész szakaszból. Feltételezhető, hogy a kisebb kamrát utólag próbálták kibővíteni, amit azonban sohasem fejeztek be. Talán ekkor született meg az ötlet, hogy a sírkamrákat inkább a piramis belsejébe építik. Amennyiben volt egy felépítmény a sírkamra felett, akkor az a felfelé induló folyosó vonaláig tarthatott. Ebből a feltételezésből kiindulva, Kheopsz nem akarta használni az „ódivatú”-nak számító földalatti kamrát, az Ő építkézése a felfelé vezető folyosóval kezdődött.

2.2. Felfelé vezető folyosó

Egy felfelé vezető folyosó ötlete már megfogalmazódott Sznofru kis szatellit piramisában. Ez a járat rossz állapotban van, a mészkkő sok helyen szétmállott. Egységes távolságokban nagy függőleges támaszkövek akadályozzák meg az alagút „lecsúszását”. Ezek a támaszkövek hatalmas „lyukas” monolitok, amiken a folyosó átvezet. A kialakítás azt bizonyítja, hogy egy ilyen felfelé vezető alagút építésében bizonytalanok

lehettek. A rossz minőségű kövek használata a több fázisú építkezésre utalhat, vagy csak az egyik közeli mészkkőbánya volt rossz választás. A folyosó szélessége két királyi könyök (104 cm), ami szabványosnak mondható az építkezésen. Ez az a szélesség, amit kőgerendával közvetlenül le „mertek” fedni. A meidumi piramisban, ahol kiszélesedik a járat, álboltozatos tehermentesítő kamrákat építettek fölé.

2.3. A „nagy üreg” és a nyereggerendák építése

A folyosó végén az út elágazik: az egyik irányban a nagy galéria található, míg egy vízszintes járat a királynő kamrához vezet. Ennek a vízszintes járatnak a szintje [5] pontosan megegyezik a nemrég feltárt „nagy üreg” padlóvonalával [5. ábra]. Elképzelhető, hogy ez egy tervezett bejáratnak készült, de valószínűbb, hogy itt tesztelték először a mészkkő nyereggerendák építési technikáját.

Az eredeti bejárat feletti szokatlan szerkezeti megoldások régóta foglalkoztatják a kutatókat. A lefelé vezető folyosó áthidalói túlméretezettek, a felfelé vezető elhelyezkedő dupla nyereggerenda-pár pedig túl magas van ahhoz, hogy tehermentesítés céljából építették

volna. A felfedezett „nagy üreg” pedig tovább fokozta a bizonytalanságot.

A feltárt folyosó a szakirodalomban kezdetben „nagy üreg” néven jelent meg, jelenleg azonban az „északi oldali folyosó” (NFC: North-Face Corridor) elnevezés a legelterjedtebb [6]. A folyosószakasz végén a padlószint megemelkedik, ami egyben a királynő kamrájához vezető folyosó szintjével is megegyezik. Elképzelhető, hogy ezt a fedett teret eredetileg egy másodlagos bejáratnak szánták, ám ezt az elképzelést később elvetették.

Valószínűbb, hogy miután elérték a királynő kamra magasságát, itt tesztelték a nyereggerendák építési technikáját. Ez a lefedési mód korábban még nem fordult elő az egyiptomi építészetben. A gerendákat szinte pontosan egymásnak döntve építették meg, az oldalirányú eltolásuk nem jelentős. A gerendák felső végei közelében kis bemélyedések találhatók, amelyek szinte biztosan fa támaszok fészkeiként szolgáltak (5. ábra).

Egy ilyen folyosó minél közelebb kerül a külső burkolathoz, annál nagyobb szerkezeti kockázatot jelent, ha a végén nem kap megfelelő megtámasztást. Lehetséges, hogy ez a felismerés vezetett a másodlagos bejárat tervének elvetéséhez. Ugyanakkor a statikai megtámasztásról mégis próbáltak gondoskodni: a napjainkban is látható két-két kőgerenda-pár feltehetően ezt a funkciót látta el.

A bejárat két oldalán fennmaradt kőmaradványok alapján megkísérelhető a második „üreg” rekonstruálása. Ez az újabb szerkezet egyaránt szolgálhatott a nyeregszerkezet tesztelésére és a statikai megtámasztás biztosítására. A két „folyosó” azonban nem kapcsolódik egymáshoz, közöttük az átjárás elképzelhetetlen. A második „üreg” gerendái valószínűleg döntött helyzetben álltak, és nem kizárt a kétszintes kialakítás sem. Elhelyezkedése miatt már a bejárat tehermentesítésének szerepe sem tűnik irreálisnak.

A két nyereg kialakítása azonban szerkezetében és kivitelezésében is teljesen eltér egymástól. Az első (beljebb lévő) szerkezet faoszlopokkal lett megtámasztva, és szélesebb gerendákból épült. A második szerkezet az építés során vízszintes fa gerendákra támaszkodott, ezt a megmaradt kőtámaszok is alátámasztják. Ezek a nyereggeren-

dák magas, de vékony mészkövekből állnak. Ez a forma akár a bejárat folyosó hatalmas áthidaló gerendáiból is kivágható lett volna. Nem kizárt, hogy a ki nem faragott, megmaradt nyereggerendákat vízszintes áthidalóként építették be.

A belső folyosó oszlopfészkeit és fa oszlopait nehéz úgy elképzelni, hogy az építés során valódi segítséget nyújtottak volna. Szinte lehetetlen úgy manőverezni a több tíz tonnás kövekkel, hogy az oszlopok pontosan illeszkedjenek a mélyedésekbe. Valószínűbb, hogy ezeket a már felépített „tetőszerkezet” utólagos megtámasztására használták. Egy ilyen megtámasztás indokolt lehetett, ha a szerkezet tetején később még nagyobb köveket mozgattak [7].

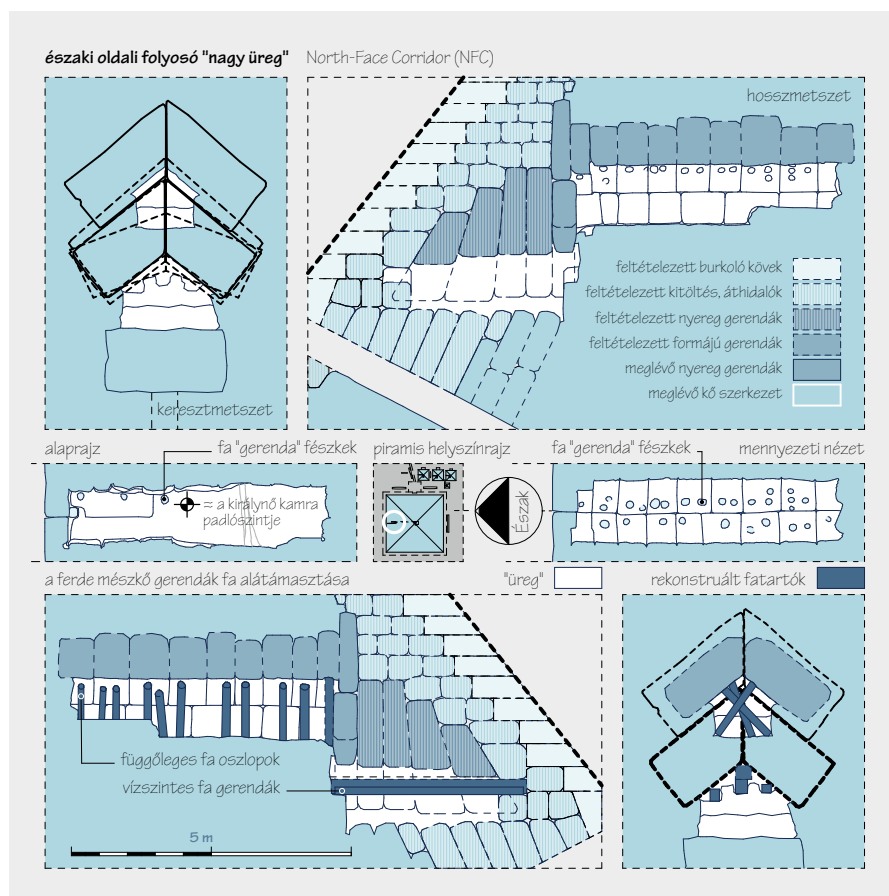
Mivel a faanyag rendkívül értékes volt, az építkezés egy bizonyos fázisában a fa támaszokat az üresen hagyott oromzaton keresztül eltávolították. Az oldal-záró köveket felülről ki lehetett emelni, illetve utólag is be lehetett helyezni. A folyosó rusztikus felületeit

simára lehetett volna csiszolni, de a jelenlegi állapot azt mutatja, hogy ez nem történt meg. Amennyiben ez csupán egy próbaépítmény volt, valószínűleg eleve nem is tervezték végleges kialakítását.

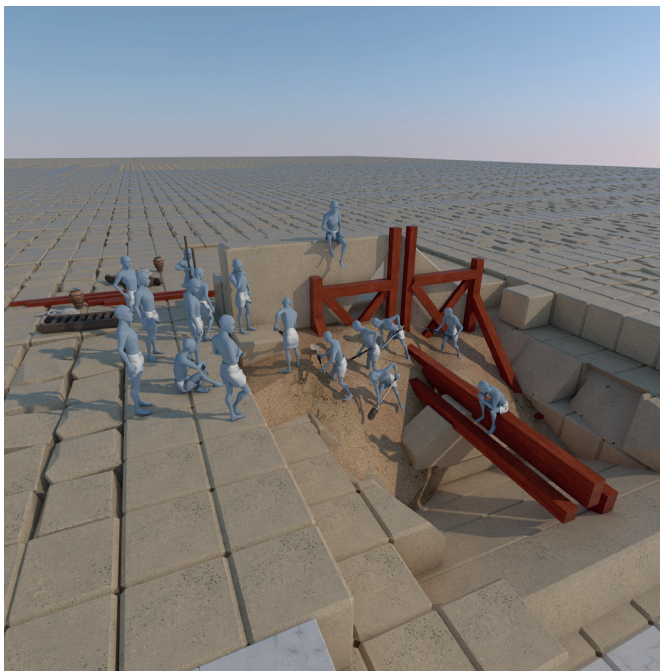
2.4. Királynő kamra

A sírkamra elnevezése félrevezető, mert a piramisban elméletileg nem temettek el a fáraón kívül mást. Igaz, hogy minden piramist kiraboltak, ezért egyetlen piramisban sem találtak soha kincseket vagy fáraó múmiát. A sírkamra padozatán fa oszlop fészkek maradtak meg, amik a nyereggerendák építéséhez adhattak állványzatot. A kamra oldalfalában egy álboltozatos falmélyedés található. A kutatók feltételezték, hogy ez egy titkos kamrába vezet, ezért „feltáró” járatokat ástak.

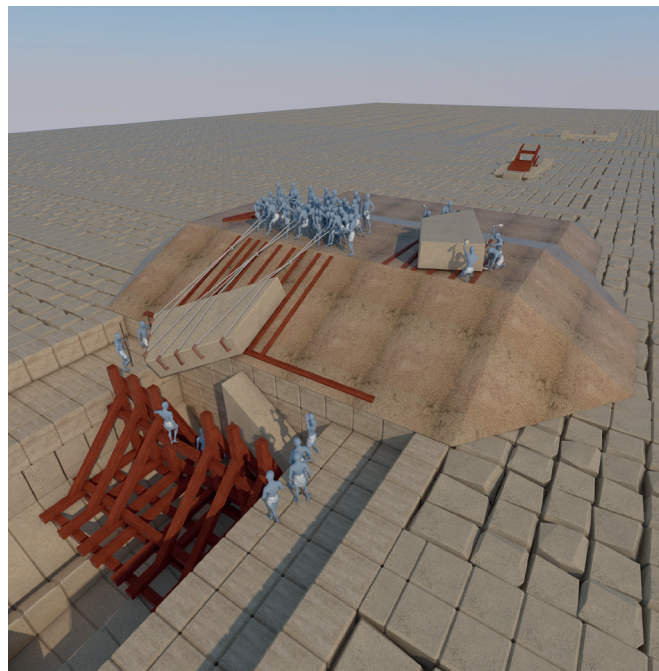
A kivitelezés szempontjából ennek a „nyílásnak” sokkal valószínűbb magyarázata is adható. A kamra nyereggeren-



5. ábra: A bejárat nyereggerendák kialakítása (metszeti ábrázolás)



6. ábra: A bejárat feletti kőgerendák elhelyezése homok segítségével



7. ábra: A kőgerenda függőleges leeresztése

dáinak építéséhez, megtámasztásához tudjuk, hogy használtak faoszlopokat. Feltételezhető, hogy megtámasztásnak ideiglenesen köveket, homokot is használtak. A tetőgerendák elkészülte után a nagy szerkezeti állványzatot, köveket a kis, csatlakozó vízszintes folyosón nem tudták volna kivinni. A kamra mellett ezért ideiglenesen építettek egy aknát (3. ábra). Az aknába átvezető nyílás méretéből adódóan csak álboltozatos kialakítású lehetett. A segédszerkezetek eltávolítása után az aknát feltöltötték, a nyílást befalazták.

A befalazott átjáró álboltozatos formája vélhetően az első sírrablóknak is szemet szúrt, ezért kibontották azt, de mögötte már csak a feltöltött akna köveit találták. Ezeket a kibontott köveket, sok más kővel egyetemben a „tisztítási” során hordhatták ki. A „falfülke” nem szimmetrikus elhelyezése is ezt az elméletet támasztja alá.

2.5. Nagy galéria

A nagy galéria ferde kialakítású álboltozatos rendszere sem tekinthető előzmény nélkülinek, hiszen a Meidum piramisban a tehermentesítő kamrák hasonló felépítésűek. A különbség a méretben van és abban, hogy itt a folyosót és a tehermentesítő sávot ösz-

szevonták. Ilyen monumentális méretű kialakításra csak a gránitdugók miatt nem lett volna szükség, mint az említett szatellit piramis példája is megmutatta. Ilyen széles folyosó építésére vélhetően a fáraó temetési tárgyainak a tárolására miatt lehetett szükség.

A folyosó mindkét oldalán egyforma távolságban falmélyedések találhatók [8]. Ezek a mélyedések legvalószínűbben olyan fagerendákat tartottak, amik az álboltozat építési állványzataként szolgálhatott (3. ábra). A ferde álboltozat mészkő köveit nagy pontossággal kell a helyükre tolni. Amennyiben túltolnak egy követ, gyakorlatilag lehetetlen lenne azt visszahúzni a helyére. Az állványzat nemcsak a pontos elhelyezést, hanem a kövek lebillenését is meg kellett, hogy akadályozza. Az álboltozat túlnyúlása csak egy tenyérnyi, egy kő így biztonságosan elhelyezhető, de amíg a boltozat kövei nincsenek megfelelően leterhelve, fennállhat a lebillenés veszélye.

A boltozattal párhuzamosan 2/3 magasságban mindkét oldalon található egy 10 cm vastag bemélyített horony. Ez egy ferdén futó fafödémeket tarthatott. Ez a födém (tető) állványzatként szolgálhatott az építés során, védte a galériát a behulló homoktól, de „munkavédelmi” szempontból is indokolható a 10 méteres mélység felett. A falmélyedésekbe

illesztett gerendák a temetés során tartották lépcsős kialakításban pódiumokat, burkolatot vagy álmennyezetet is.

A piramis folyosó rendszere, de a nagy galéria sem szolgálhatott a piramis építése során a kövek mozgatására. Olyan elképzelés, ami a zárókövek lecsúsztatásán kívül a kövek mozgatását belső folyosókon képzelel el [9], alapvetően téves mérnöki szempontból. A méretek nem teszik lehetővé a manőverezést, a munkások elhelyezését. Egy belső álboltozatos, spirális rámpa építése mérnöki szempontból nagyobb kihívás, mint bármelyik ismert belső kamra felépítése. Egy ilyen, a külső felülettel párhuzamos álboltozat nincs megfelelően leterhelve, az összeomlana, valamint a sarkokon egy nagyobb kő mozgatása lehetetlen.

2.6. Király kamra

A lecsúszó záróköveken kívül a piramisban csak a királykamra építéséhez használtak gránitot [10] A gránit olyan kemény, hogy a sírrablók azt csak nagy nehézségek árán tudták volna áttörni. Az előkamra (1. ábra) biztonsági rendszerében is lecsúszó gránit lapok zárták el a kamra bejáratát. A kirabolt sírkamra azonban azt bizonyítja, hogy az emberi „lelemény” itt is győzött a kemény kővel szemben. A kamrát itt

hatalmas, vízszintes gránit gerendák fedik. Egy ilyen gerenda akár 80 tonnát is nyomhat **[4. ábra]**. Ezek a gerendák azonban nem bírták volna el a fölé tornyosuló kövek súlyát, ezért teherelosztó kamrákat építettek fölé.

A fáraó feltételezett végső nyughelyét öt egymásra épített tehermentesítő kamra védi a beomlástól. Az alsó négy kamrát vízszintes gránit gerendák fedik. A legfelső kamra mészkő nyereggerendákkal fedett. Teherelosztás szempontjából statikailag a legfelső kamra is elég lett volna, de akkor a szerkezet oldalnyomása veszélyeztette volna a nagygalleria tetejét. Az, hogy a teherelosztó kamrák magasra nyúljanak, végső soron a rájuk nehezedő kősorok számát (az összterhelést) is csökkenti.

3. | A kamrák lefedése

A piramis köveit, beleértve a legnagyobbakat is, rámpák és szánok segítségével a megfelelő helyükre lehetett szállítani. A sírkamrák lefedését azonban sokkal nehezebb megmagyarázni. A ferde mészkő nyereggerendák átlagosan 35 tonnásak, a hatalmas, vízszintes gránit gerendák pedig elérik a 80 tonnát. A lefedéshez fa, kő- és homok állványzatot használhattak, az oldalirányú mozgathoz pedig fa gerendákat és rámpákat. A mozgathat olajozás vagy a csúszós gipszhabarcs könnyíthette meg.

3.1. Vízszintes gerendák

A legnagyobb gránit gerendák mozgathatása a méretük ellenére a legegyszerűbb. Alacsony súrlódás mellett fa szánokkal és fa gerenda sínekkel, vízszintesen 160 ember tud elhúzni 80 tonnát [11]. A királykamrát fel kell tölteni homokkal és egy 6°-os rámpán le lehet engedni a köveket a helyükre. Egy ilyen beolajozott lejtőn a kő magától lecsúszik, és 20 ember elég az ellentartáshoz **[4. ábra]**. A homokot eltávolítani a még be nem fejezett nagy galéria végén lehet. A tehermentesítő kamrák gerendáit hasonló módon lehet megépíteni, a homok a kamra hiányzó végfala eltolható.

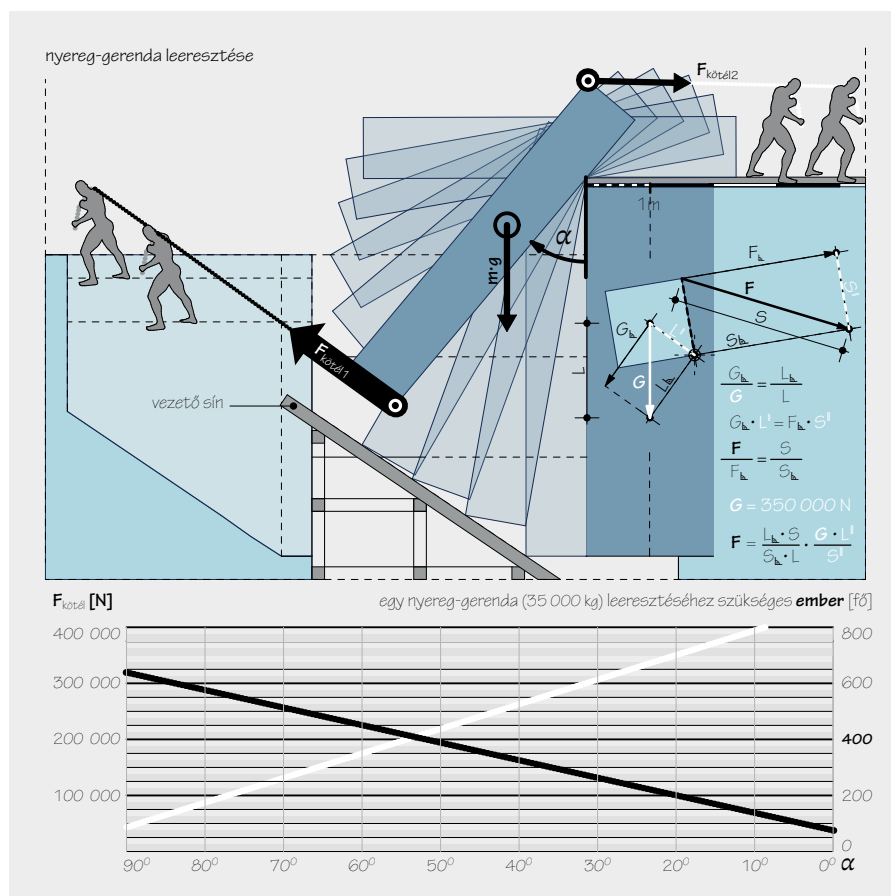
3.2. Nyereggerendák

A ferde kőgerendák mindenhol mészkőből készültek. Sok elmélet foglalkozik az elhelyezéssel és legtöbbször a kövek helyre illesztését az alattuk lévő homok eltávolításával képzelik el. Arra lehet elméletet kidolgozni, hogy egy homokkal feltöltött sírkamra fedőköveit a homok kilapátolásával illesztik helyre **[6. ábra]**. Ebben az esetben biztosítani kellene, hogy a kövek oldalirányba ne tudjanak elmozdulni. Ez nagyon komoly fa támrendszert feltételez, és az esetleges elmozdulásokat szinte lehetetlen utólag korrigálni. Két egymásra helyezett gerenda rendszer esetében a felső elhelyezésére ez a módszer nem ad magyarázatot. Ilyen dupla gerendázatra pedig jól láthatóan a bejárat felett láthatunk példát. Elképzelhető, hogy a királynő kamra és a legfelső tehermentesítő kamra felett is dupla gerendázat van, azonban ezt még nem tárták fel. Egy 35 tonnás gerendát vízszintesen 60 ember el tud húzni olajozott szánokon.

3.3. Függőleges leeresztés

Egy magasabb pozícióba húzott mészkő gerendát függőlegesen is a helyére lehet eresztetni **[7. ábra]**. Ebben az esetben komoly megtámasztó szerkezetre van szükség, ami nem engedi kimozdulni a helyére csúszó követ. A kő a saját súlyától is a helyére csúszna (esne), azonban a végén olyan gyors lenne az ütközés, hogy az könnyen eltörhetne.

Amennyiben kontrollálni szeretnénk a kő mozgását, kiszámíthatjuk az ellentartáshoz szükséges erőt, illetve a mozgathoz szükséges emberek számát **[8. ábra]**. Egy ember a számításban 500 N erővel tudja tartani a kötelet. 4-5 cm átmérőjű kenderkötelek használatakor azok húzószilárdsága elegendő a kövek mozgathoz, az ellentartáshoz. A lecsúszó kő megtartásához célszerű két csapatot használni, mert a geometriából adódóan a mozgathoz elején vagy a végén hatalmas erők jelennek meg. Meghatároztam



8. ábra: A kőgerenda vízszintes leeresztéséhez szükséges ellentartó erő (metszeti ábrázolás)

az egyensúlyhoz szükséges erőket az ábrázolt minden fázisban, statikailag határozott szerkezetként, a rajzon megadott képletek alapján. A nyílak az erőket, a kóták a hosszakat jelölik. A grafikonokon jelölt erők színezése az adott kötelek színe szerint történt. (A számítás statikai egyensúlyt modellez, nem számol a kő csúszásával, a kő magától is lecsúszna, az ellentartásra annak biztonságos és szabályozott elhelyezése miatt van szükség.) Egyirányú húzás esetén (a számítások erre vonatkoznak) maximálisan 600-800 emberre van szükség, hogy a kő ne magától zuhanjon le. Két irány esetében 400+400 ember a létszámszükséglet, ami nem kedvezőbb az előző megoldáshoz képest. (Félúton megtámasztva a követ a 400 ember átmehetne a másik oldalra, de ez a gyakorlatban kivitelezhetetlen.) A piramison rendelkezésre állhatott ez a létszám [12], de mérnökként nem ez tűnik a legjobb megoldásnak. 700 ember a követ pusztá kézzel meg tudná emelni, ha hozzáférne.

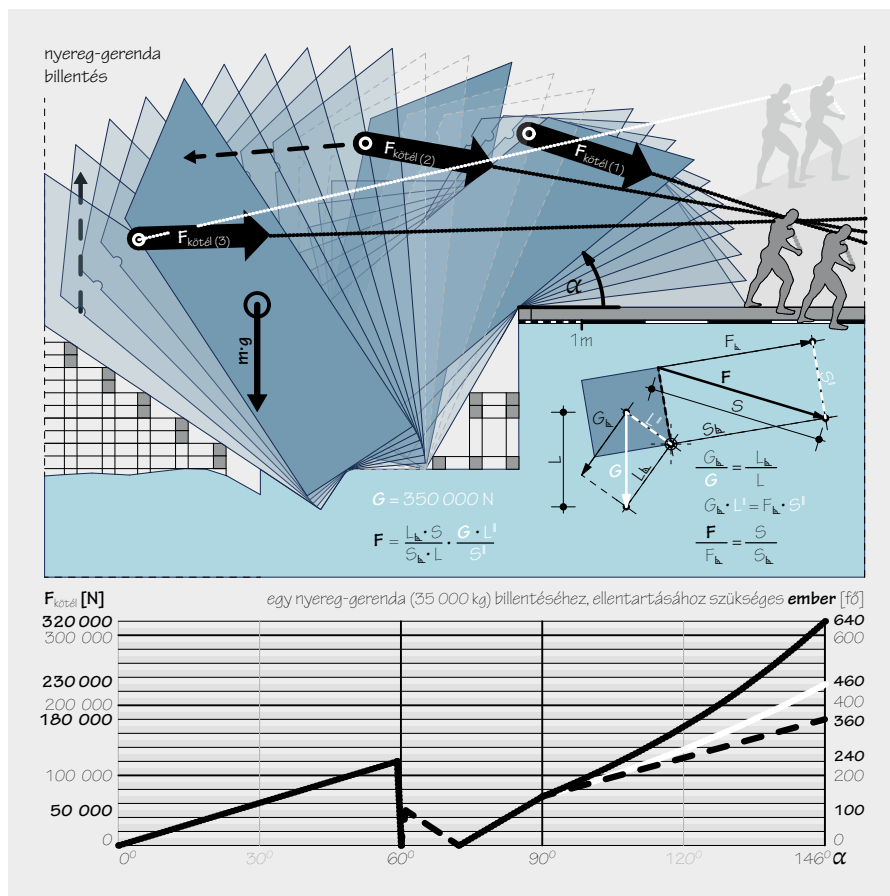
3.4. Billentés

A nyereggerendákat egy megfelelően előkészített fogadó szinten, oldal irányban is a helyükre lehet billenteni. A billentésnek megvan az az előnye, hogy több olyan stabil pozíció is adódik, ahol a húzóerő irányát meg lehet változtatni a folyamat közben, így a munkások átvezényelhetők egy másik pozícióba. A műveletet a **9. ábra** mutatja be. A grafikonon az erők jelölése az ábra erő jelöléseit követi. Az átbillentésnél a kő saját súlyától a helyére tudna esni, de ez is a repedés, törés kockázatát jelentené. Ennél a megoldásnál sem lehet elhagyni az oldalirányú megtámasztást, valamint azt az állványzatot, ami a köveket alátámasztja. Több szakaszra bontva a mozgatást, 200, illetve 400 ember szükséges a helyre illesztéshez. Amennyiben csak lassítani szeretnénk az „esést”, kevesebb ember is elég lehet, de akár növényi bálákkal is tudjuk csökkenteni a „becsapódás” erejét.

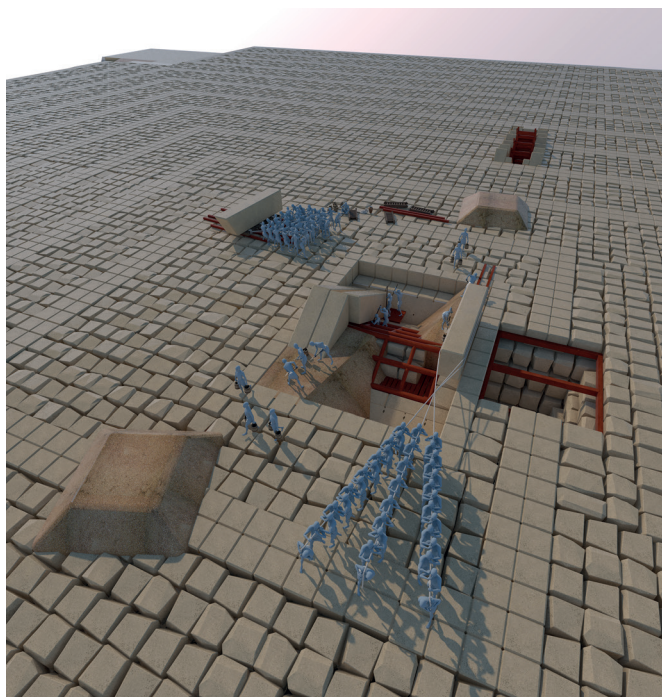
3.5. Eltolás

Készítsünk egy állványzatot, ami a nyereggerendák alátámasztását szolgálja. A gerendák kedvezőbb megtámasztása érdekében az egymásnak támaszkodó gerenda párokat el fogjuk tolni egymáshoz képest. A kamra felét homokkal feltöltjük vagy fa alátámasztást használunk. Az első gerendát vízszintesen elhúzzuk a kamra feléig, ott átbillentve a helyére csúsztatjuk. A vízszintes állványzatot (homokfeltöltést) áthelyezzük a kamra másik oldalára. Az előbb elhelyezett kő mellett a másik irányból egy követ lecsúsztatunk a szemben lévő oldalra. Ez a kő vízszintes irányban nincs a helyén, ezért azt oldalirányban a helyére kell csúsztatni (**10. ábra**). Mivel a szemben lévő kövek tengelyei nincsenek egy vonalban, ezért ezt az oldalirányú elmozdítást csak a kő szélességének a felével kell elvégezni. A csúszást a gerendák olajozása megkönnyítheti. Az alátámasztó gerendák minimális túlelemelésével (alátét lécz) a szemben lévő kövek nem akadnak össze. A királynő kamra tetőszerkezetének építéskor a mellé ideiglenesen kihagyott „gödör” a kivitelezést nagyban megkönnyíti.

A gerendák vízszintes mozgatásakor előnyös a jól csúszó olajozott felület. Ebben az esetben 80 ember a kamra feléig el tudja húzni a követ. Innen az magától a helyére csúszna, de a kő csúszását 100 ember teljesen kontrollálni tudja. A súrlódási együtthatót növelve, érdes fagerendákat használva pár ember elegendő a lecsúszás irányításához. Kedvezőtlen körülmények között 100 ember biztosan meg tudja tartani a mozgó gerendát (**11. ábra**). A második gerendát az ellentétes oldalról csúsztatják a helyére. A gerendát az alátámasztó állványzaton vízszintesen a helyére kell tolni. Egy 35 tonnás gerendát fa feszítő gerendák segítségével 10 ember a helyére tud tolni. Ez a megoldás két egymásra rakott gerendásor esetében is használható. Ilyenkor az alsó gerendák állványzatként szolgálnak, a csúszást a felületek között pedig híg gipszhabarcs biztosítja.



9. ábra: A nyereggerendák billentéséhez szükséges erők (metszeti ábrázolás)



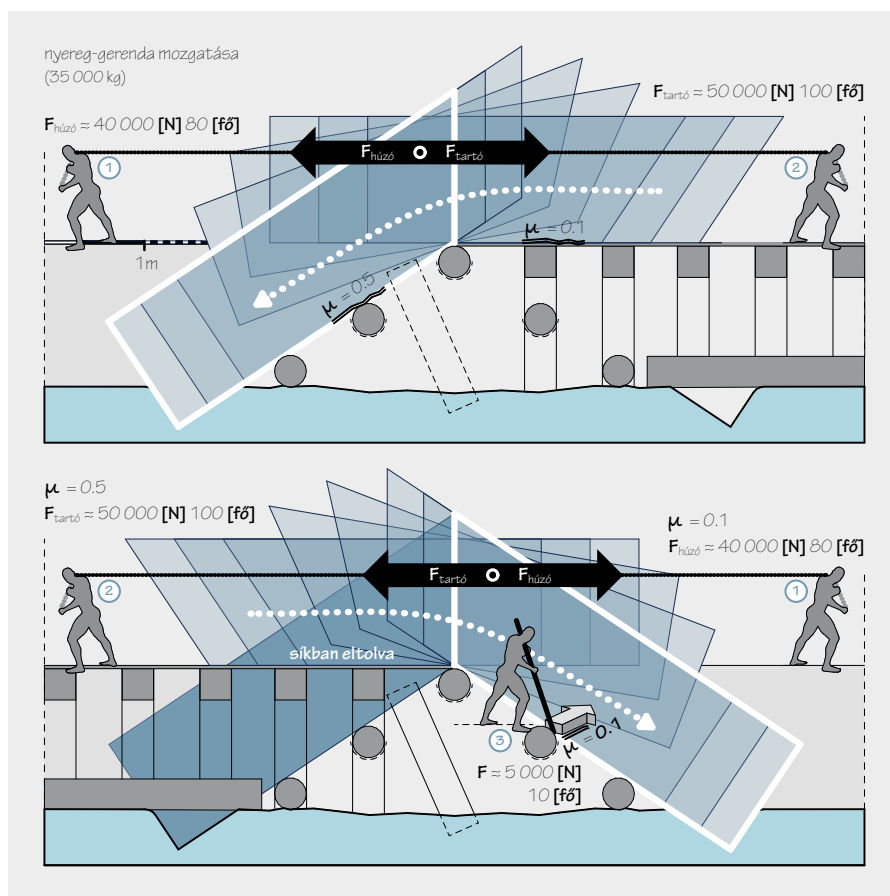
10. ábra: A királynő kamra tetőszerkezetének építése

4. | Összefoglalás

Építésként a 11. ábra szerinti megoldást tartom a legvalószínűbbnek. Természetesen nem tudhatjuk, hogy a valóságban milyen kivitelezési módszert alkalmaztak, azt azonban sikerült igazolni, hogy ezeknek a hatalmas gerendáknak a beillesztése technikailag megvalósítható. Kheopsz piramisa nem csak a méretében, hanem a belső kialakításában is egyedülálló. A felhasznált szerkezetek mérete, bonyolultsága komoly erőforrásokat vehetett igénybe. A hatalmas köveket nagy magasságba kellett szállítani. Ez rámparendszerekkel megoldható, de a rámpák szélessége a gerendák mérete miatt igen jelentős volt, ami lassította az építkezést. A hatalmas munka és a kivitelezés bonyolultsága mély nyomot hagyhatott az utódokban, mert az ezt követő valamennyi megépült piramis kisebb méretekkel rendelkezett. A belső sírkamrák kialakítása és száma pedig sokkal egyszerűbb lett.

Irodalomjegyzék

- [1] Keith Hamilton: The Great Pyramid Void, A layman's guide. <https://www.academia.edu/98053499>
- [2] Peter James: Saving the Pyramids: Twenty First Century Engineering and Egypt's Ancient Monuments. University of Wales Press, 2018.
- [3] Aidan Dodson: The Layer Pyramid of Zawiyet el-Aryan: Its Layout and Context. Journal of the American Research Center in Egypt, vol. 37 (2000), pp. 81-90. <https://doi.org/10.2307/40000524>
- [4] Mark Lehner, Zahi Hawass: Giza and the Pyramids: The Definitive History. University of Chicago Press, 2017.
- [5] Mohamed Elkarmoty, Johannes Rupfle, Khalid Helal és munkatársai: Localization and shape determination of a hidden corridor in the Great Pyramid of Giza using non-destructive testing. NDT & E International, vol. 139 (2023), 102809, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102809>
- [6] Hany Helal, Mehdi Tayoubi: Le couloir de la face nord de la Grande Pyramide (SP-NFC) découvert par la mission ScanPyramids. Bulletin de la Société française d'égyptologie (2024) no. 211, pp. 67-82
- [7] Sébastien Procureur, Kunihiro Morishima, Mitsuaki Kuno és munkatársai: Precise characterization of a corridor-shaped structure in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. Nature Communications, vol. 14 (2023), no. 1144. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36351-0>
- [8] W. M. Flinders Petrie: The Pyramids and Temples of Gizeh (revised edition). Histories & Mysteries of Man, 1990.
- [9] Bob Brier, Jean-Pierre Houdin: The Secret of the Great Pyramid: How One Man's Obsession Led to the Solution of Ancient Egypt's Greatest Mystery (illustrated edition). Smithsonian, 2008.
- [10] Dietrich Klemm: The Stones of the Pyramids: Provenance of the Building Stones of the Old Kingdom Pyramids of Egypt (1st edition). De Gruyter, 2010.
- [11] Tom Fowlie, Michael Douglas: Decoding The Great Pyramid. NOVA PBS, 2019, <https://youtu.be/gFP-7Z9HLww>
- [12] Mark Lehner, Pierre Tallet: The Red Sea Scrolls: How Ancient Papyri Reveal the Secrets of the Pyramids. Thames & Hudson, 2022.



11. ábra: A gerendák eltolása (a súrlódási tényezők a nyugalmi állapotra vonatkoznak)