



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**A Hassan Fathy-féle boltozatok tönkremenetelének és
sérüléseinek vizsgálata, lehetséges okainak feltárása a New
Gourna-i épületeken**

TDK konferencia
Építészmérnöki kar
2019

Szerzők:

Kövesdi Andrea
Szabó Simon

Konzulensek:

Dr. Hegyi Dezső
Vasáros Zsolt DLA
Dr. Csicsely Ágnes

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Ipari és Mezőgazdasági Épülettervezési Tanszék

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| Absztrakt | 5 |
| 1. Bevezetés..... | 6 |
| 2. Hassan Fathy | 8 |
| 2.1 Munkássága | 8 |
| 2.2 New Gourna Projekt | 9 |
| 2.3 New Baris, Kharga-oázis..... | 10 |
| 2.4 Az új-mexikói projekt..... | 10 |
| 3. Boltozatok | 12 |
| 3.1 A „szokásos” falazási és szerkesztési technikák | 12 |
| 3.1.1 Térlefedések formái és megtámasztásuk..... | 12 |
| 3.1.2 Kupás falazás..... | 12 |
| 3.1.3 Gyűrűs falazás | 13 |
| 3.1.4 Fecskefarkas (halszálkás) falazás | 13 |
| 3.1.5 Núbiai boltozat (parabolaíves boltozat) | 14 |
| 3.2 Fathy tapasztalatai és a közel-keleti boltozatépítési hagyományok | 15 |
| 3.3 Terepmunka során gyűjtött tapasztalatok..... | 19 |
| 3.3.1 A Ramesszeum „núbiai” boltozatai..... | 19 |
| 3.3.2 El Bagawat csehsüveg boltozatai | 20 |
| 3.3.3 Mecset, New Gourna..... | 21 |
| 3.3.4 Khan, New Gourna..... | 22 |
| 4. Vályog..... | 23 |
| 4.1 A vályog, mint építőanyag | 23 |
| 4.2 A vályog létjogosultsága száraz, sivatagi környezetben | 23 |
| 4.3 Általános tulajdonságok, szilárdsági adatok..... | 24 |
| 4.3.1 A vályog, mint nem standardizálható építőanyag | 24 |
| 4.3.2 Nyomószilárdság..... | 25 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.3.3 | Zsugorodás | 26 |
| 4.3.4 | Kúszás | 26 |
| 4.3.5 | Vízállóság..... | 26 |
| 4.4 | Anyagvizsgálatok | 27 |
| 4.4.1 | Színvizsgálat (ásványi szennyeződések vizsgálata)..... | 27 |
| 4.4.2 | Hidrometrálás – agyag-iszap tartalom ülepitéses vizsgálata..... | 29 |
| 4.4.3 | Gyúrópróba..... | 31 |
| 5. | Esettanulmány | 32 |
| 5.1 | A Khan bemutatása..... | 32 |
| 5.2 | Anyagtulajdonságok meghatározása | 36 |
| 5.2.1 | Modellt alkotó komponensek | 36 |
| 5.2.2 | Vályogfalazat | 38 |
| 5.2.3. | Kőfalazat | 47 |
| 5.2.4. | Talaj..... | 49 |
| 5.3. | Modellek felépítése | 54 |
| 5.3.3. | Terhek felvétele..... | 54 |
| 5.3.4. | Végeselemháló felvétele | 54 |
| 5.3.5. | 2D modell..... | 55 |
| 5.3.6. | Észrevételek/tapasztalatok a 2D modellkísérletekből:..... | 56 |
| 5.3.7. | 3D modell..... | 62 |
| 5.4. | Tönkremeneteli mechanizmus meghatározása | 63 |
| 5.5. | Eddig alkalmazott rekonstrukciók hatása | 66 |
| 5.5.3. | Szélső falazott állás | 66 |
| 5.5.4. | Hosszoldali támfal..... | 67 |
| 5.6. | Javasolt rekonstrukciós lehetőségek..... | 68 |
| 6 | Konklúzió..... | 69 |
| 7 | Köszönetnyilvánítás | 71 |

| | | |
|----|--|----|
| 8 | Felhasznált irodalom | 72 |
| 1. | Melléklet: Klímadiagramok | 75 |
| 2. | Melléklet: Colonel Debes kísérlet kivonat | 76 |
| 3. | Melléklet: Modellben alkalmazható anyagmodellek összehasonlítása | 77 |

Absztrakt

Hassan Fathy (1900-1989) napjaink egyik legismertebb egyiptomi modern építésze. Szenvedélye volt a vidék, melynek gazdaságát és életszínvonalát minimális költségvetéssel, de annál nagyobb lelkesedéssel és energiabefektetéssel, építészeti eszközökkel igyekezett megoldani.

Legjelentősebb munkája és hagyatéka a New Gurna projekt, mely ma már UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) védelem alatt áll. Itt mind az építészeti, mind a mérnöki, a szociológiai és a művészi álmait is megvalósíthatta. Újjáélesztette az antik falazási, építési, várostervezési és iparművészeti technikákat és nem utolsó sorban a sártégla használatát. Boltozat formáihoz az iszlám, a kopt és a núbiai építészeti hagyományokból merített ihletet. A núbiai boltozatfalazás technikáját még ismerő és gyakorló mesteremberekkel dolgozott együtt házai megépítésénél. A vályogtéglát kezdte használni az épületeinél, amely olcsó, szinte bárhol előállítható építőanyag, mely a száraz éghajlaton kedvezően viselkedik, hiszen sem csapadék sem fagy nem jellemző erre a területre. Azonban egyes helyeken kedvezőtlen hatása lehet a talajvíznek és annak ingadozásának.

Vajon a Gurna-i épületek állagromlását és stabilitásvesztését mennyire befolyásolja az eredeti formai és anyagválasztási koncepció? Dolgozatunkban erre a kérdésre keressük a választ.

Vizsgáljuk az anyagot, a környezetet, az alkalmazott technológiát. A tartószerkezeteket numerikus számítások segítségével modellezzük, lekövetve a New Gurna-i építmények tönkremenetelének okait. A megtámasztások és az anyag paraméterek változtatásával rekonstruáljuk a károsodott épületeket, hogy kiderítsük, mely hatások dominálnak az épületek állapotának folyamatos romlásában.



1. ábra: Vályog árkádsor, Khan, New Gurna, Egyiptom, forrás: saját fotó

1. Bevezetés

Hassan Fathy (1900-1989) korunk egyik legismertebb, az iszlám világban óriási reputációval rendelkező egyiptomi építész. Az 1940-es évek második felétől épült, a saját korában szokatlannak számító új formai megoldásai és akkor újszerűnek ható tervezési módszertana később jelentős nemzetközi figyelmet kapott. Főként a 80-as évektől kezdve számos, a munkáit összefoglaló és elemző mű született. A vernakuláris és a modern építészet jegyeit egyszerre mutató épületei és az építészet határterületein elért eredményei a kiterjedt irodalom megismerése után is számos kérdést vetnek fel. Kísérleti faluja, New Gourna¹ a globális érdeklődés középpontjában áll, sajnos állagromlása miatt 2010 óta a WMF (World Monuments Fund), valamint az UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) megfigyelése alatt áll. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Ipari és Mezőgazdasági Épülettervezési Tanszéke (továbbiakban: Ipartanszék) is aktívan kutatja ezt a területet egyik konzulensünk, Vasáros Zsolt DLA vezetésével².

A figyelemre méltó épületek az általános avulás, illetve néhány esetben a gondatlan használat miatt rohamosan pusztulni kezdtek. Konzerválásuk, vagy még inkább renoválásuk, bizonyos esetekben esetleges újraépítésük gondos felmérő és dokumentáló munkát igényel. Az Ipartanszék a „Hassan Fathy Survey Mission” keretében 2015 óta Egyiptom-szerte készít helyszíni felmérési- és fotódokumentációt, többek között New Gournában, Faresben és Garagusban. Eddig nagyságrendileg 300 épület került az adatbázisba. Ide részben a Fathy által tervezett és még fennálló épületek, másrészt a Fathy által analógiaként használt, elsősorban vernakuláris és történeti előképek, valamint az archívumokban fellelhető tervek és fotódokumentációk kerülnek³. A gyors állagromlás miatt a kutatómunka különösen aktuális és fontos, melyet Vasáros Zsolt az Országépítő folyóiratban [1] is hangsúlyoz. Egyes épületek a felmérés óta sajnos már el is tűntek. A 2019 márciusában szervezett misszióban jelen dolgozat szerzői is részt vehettek. A két hét alatt ellátogattunk a Luxor nyugati partján található

¹ New Gourna: A Nílus nyugati partján fekszik, Luxor városával szemben, a Luxor-i kormányzóság fennhatósága alatt áll. Több elnevezése is ismert: Kurna, Gourna, Gurna, Qurna, Qurnah vagy Qurneh; arabul: القرنة. Ez az elnevezés a thébai hegyek lábánál elhelyezkedő három falut fogja össze: New Qurna vagy New Gourna, Gourna vagy Old Gourna és Sheikh ‘Adb el-Qurna). New Gourna az 1940/50-es évek fordulóján épült, Model Village-ként is ismert. A számos elnevezés közül tanulmányunkban a New Gourna elnevezést használjuk, a nemzetközi irodalomban is leginkább így használatos.

² A dolgozat témafelvetése illeszkedik az Ipartanszéken folyó, a krízisépítészet tárgykörébe tartozó kutatásba, melyet Vasáros Zsolt DLA Bolyai (2018-2020) és ÚNKP (Bolyai+, 2019-2020) ösztöndíja is támogat. A dolgozat konzultációja az „Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”.

³ Kiemelendő az American University in Cairo Rare Books and Special Collections-nel való együttműködés, amely keretében a Tanszék projektje során készült felmérések kairói archívumba kerülnek, ugyanakkor a kutatáshoz az ott őrzött archív anyagok (Fathy szinte teljes terv-, fotó- és kéziratanyaga) felhasználhatók, publikálhatók.

jelentősebb műemlékek területére, New Gournába, Garagusba, New Barisba, illetve a Kharga- és Dakhla-oázisokban található ókeresztény és muszlim városokba, temetőkkbe. A különböző területeken álló boltozott épületeket és azok állapotát látva fogalmazódott meg bennünk a jelen dolgozat témája. Már ekkor tudatosan vizsgáltuk a környezeti viszonyokat, a tönkremenetelek vagy épp az ezeréves „hibátlan” állapot okait. A legszembetűnőbb tény, hogy a sivatagi vályogépületek koruktól függetlenül sokkal jobb állapotban vannak, mint a Luxor közelében lévő hasonló anyagból épült házak. Tanulmányunk kifejezett célja ennek a problémának a kutatása és értékelése.

Kutatásunkhoz többek között a nemzetközi szakirodalom Hassan Fathy munkásságával foglalkozó életrajzi és munkáit összefoglaló műveket használtuk. Különösen fontos az építész saját szerkesztésű *Architecture for the poor* című könyve, mely naplószerűen foglalja össze a New Gourná építését befolyásoló tényezőket, illetve magát az építés folyamatát. Az Egyiptomban töltött idő alatt ellátogattunk a Chicago House⁴ könyvtárába is, ahol az arab építészet egyéb területein használatos formákról és szerkezeti megoldásokról találtunk információkat, adatokat.

Vályog és boltozatok építése témában főleg magyar, angol és német kutatási anyagokat vizsgáltunk.

⁴ University of Chicago Oriental Institute részeként 1924-ben létesített egyiptomi intézmény Luxorban, mely dokumentálja és kutatja a luxori történelmi helyszíneket (Epigraphic Survey). Komoly szakirodalmi gyűjteménnyel rendelkezik Egyiptom történelméről többek között régészeti és építészeti témában. Emellett régészeti szempontú fontos helyszínek konzerválásában is részt vesz.

2. Hassan Fathy

2.1 Munkássága

Hassan Fathy jómódú családból származik, kairói brit iskolákban tanult, majd itt szerezte meg építészdiplomáját is. Később a Kairói Egyetem Szépművészeti Karán tanított. Kezdetben vagyonos megrendelőknek tervezett modernista villákat, majd reprezentatív épületeinél is áttért a vályog használatára – legfőképp a világháború után kialakult építőanyag-hiány miatt és egyre erősödő vernakuláris építészet iránti szenvedélye miatt. Építőfa nélkül sem szerkezetet, sem zsaluzatot nem lehetett készíteni. Szinte egyedüli építőanyagként csak a vályog maradt - és a kérdés, hogy sártéglával hogyan lehet lefedni az épületet. A válasz a boltozás, amelynek különböző szerkezeti megoldásai és az ebből következő építészeti formálás munkásságának védjegye lett.

Az 1930-as évektől kezdett komolyan foglalkozni a vernakuláris építészettel. 1941-ben diákjaival asszuáni tanulmányútra indult, ahol felfedezte a núbiai falvak építészetét, a fátimida temető ezeréves boltozatait. További útjain az iszlám és kopt építészet emlékeit, valamint a fáraók korának jelentősebb épületeit, halotti templomegyütteseit tanulmányozta. Lenyűgözte a szerkezetek egyszerű természete, a természetes anyagok mérnöki alkalmazása. A megismert szerkezeteket előszeretettel alkalmazta munkáiban.

Arisztokratikus származása és életvitele, illetve műveltsége ellenére, vagy épp azért szívügye volt a rurális életforma. Az ősi technológiák nyomán házai alkalmazkodnak az éghajlati viszonyokhoz: nagy tömegű falakkal, optimális tájolással, passzív szellőztetési, (hűtési) rendszerekkel operált. Nem csak a fizikai környezetet, de az emberek szemléletét is formálta. Elképzelése szerint kezükbe adná a tudást, amellyel saját házaikat építhetnék, környezetüket saját ízlésükre formálhatnák, az iparművességgel megélhetésüket biztosíthatnák. A részsikerek és a biztató kezdet mellett sajnos pont New Gourná esetében a kényszerű áttelepítés és a korábbi életmódtól való elszakítás a projekt iránt ellenérzéseket váltott ki. Csak a falu negyede épült fel, mára pedig csak néhány épület maradt fenn, az épületek többségét lebontották vagy átépítették.

Nem véletlen, hogy manapság egyre nagyobb figyelem irányul munkásságára, hiszen a globálisan változó klíma megköveteli az építési módszereink újragondolását is. Fathy alternatívája nem egyéni, viszonylag hosszú ideje, világszerte foglalkoznak mérnökök a vályog, mint építőanyag szerepével, tulajdonságaival, alkalmazhatóságával. A kortárs gyakorlatban is egyre jobban terjed számtalan kedvező tulajdonsága miatt. Ilyen területek pl. Németország, Magyarország, a Közel-Kelet országai, Afrika fejlődő területei, Brazília [2]. Vályoggal és

földépítéssel foglalkozó kutatóintézetek jöttek létre, pl. CraTerre, Amaco, Kasseli Egyetem, Magyar Szalmaépítők Egyesülete, Sárkollektíva.

A boltozatok és kupolák alkalmazása ma reneszánszát éli a térségben. Talán nem csak Fathy épületeinek példájára, de a zsaluzat nélkül falazhatóság és a formából következő kedvező belső klímajavító hatás miatt is aktuális a téma.

2.2 New Gourna Projekt

Az első projekt, melyben mondhatni szabad kezet kapott, New Gourna építése volt 1945 és 1948 között.

A Luxor fennhatósága alá tartozó Gourna a Nílus nyugati partján, a Királyok völgye, illetve a Királynők völgyével szomszédos területen, a thébai temetőre (nemesek sírjaira) épült. A lakosok a házaik alatt elterülő sírkamrák fosztogatásából éltek, az innen kimentett és eladott felbecsülhetetlen értékű műkincsek manapság számos múzeum gyűjteményét gazdagítják. A kormány, illetve a Department of Antiquities (Régiségügyi Minisztérium) megelégette ezt és elrendelte a kitelepítést. Ezzel párhuzamosan ki kellett dolgozniuk egy rendszert, mellyel kárpótolják a lakosságot, egyben új lakásokat és területet biztosítanak számukra.

A minisztérium tisztviselői ismerték Fathy egy korábbi vályogházát, amely az Ezbet el-Basry-i árvíz után „szociális lakásnak” készült. Emiatt kaphatta meg Hassan Fathy a feladatot, hogy minimális költségvetéssel, több mint ezer családnak tervezzen egy települést és felügyelje a kivitelezést.

1945-ben így elérkezett a nagy lehetőség, hogy „tisztá lapon” a semmiből tervezzen „modell falut” minden addigi tudását és álmait kiteljesítve, együttműködve a majdan beköltöző családokkal. A projekt sok nehézség (pénzügyi probléma, árvíz, járvány, általános elégedetlenség az áttelepített lakosság köreiből) árán, csak részben valósulhatott meg. Építészetileg egységes, egyedülálló, figyelemre méltó együttes jött létre, amely manapság a kívülállók, érdeklődők számára nagyobb értéket jelent, mint azoknak, akiknek épült.

New Gournában kialakult házak és térformák precedensként szolgáltak Fathy későbbi munkáihoz, pl. New Baris (1965), több lakóépület fejlesztéshez, szabályozási tervekhez és közösségi tér sémákhoz (városépítészeti és épület léptékben is) Egyiptomban, Pakisztánban és Irakban [3].

A WMF és az UNESCO 2010 óta végez a faluban felméréseket mind műszaki, mind szociológiai téren végig követe a település sorsát, jóllehet ennek egyelőre konkrét hasznateredménye csekély. Az eltelt majd' tíz évben az amortizáció jelentős volt, a védelemre szoruló épületek nagy része elpusztult.

Esettanulmányunkban a falu központjában, a mecsettel szemben elhelyezkedő Khan épületét mutatjuk be részletesen és vizsgáljuk meg annak károsodásait.

2.3 New Baris, Kharga-oázis

Fathy munkásságának érett szakaszában, a New Gurna Projekt után kb. 20 évvel készült el New Baris terve. A Kharga-oázistól délre felfedezett kút köré álmódott falu eredetileg 250 családot lett volna képes befogadni, akik mezőgazdasággal foglalkoztak volna. A tervezéskor a leendő lakók személye ismeretlen volt, így kicsit eltért a tervezési metódus a New Gournaitól. Terveihez a közeli Bagawat nekropoliszt (lásd még: 4.3.2. fejezetben) és a közeli Kharga-oázisbeli falvak településszerkezetét tanulmányozta. Nagy újítása a terménytárolók természetes ventilláción alapuló hűtőrendszerének kialakítása volt. A New Baris projektet több ponton is érdemes New Gournával párhuzamba állítani, melyet az irodalomban többen meg is tettek (pl. Serageldin, Steele, El-Wakil) [4][5][6]. Jelen dolgozatunkban a két helyszín földrajzi és talajadottságaival foglalkozunk a későbbi fejezetekben.



2. ábra: New Baris, Kharga-oázis, fotó: Hegyi Dezső, 2019

2.4 Az új-mexikói projekt

Fathy 1980-ban az új-mexikói Abiquiu városának megtervezésére kapott megbízást. A feladat egy vallási, oktatási, központ és lakóegyüttes volt egy addig beépítetlen területen. Az éghajlat hasonló, csakúgy, mint a funkciók. A különbség, hogy itt heves, időszakos esőzésekkel is kell számolni.

Fathy eredetileg a navajo indiánok *hogan*-formáit szerette volna megjeleníteni az épületeken, melyekről tanulmányt is készített, de a megrendelő ragaszkodott a Gournában és Barisban bevált boltozatokhoz.

A mecset teljes mértékben vályogból épült. A férfi és a női imatermet kissé csúcsíves boltozatok és egy sokszögre szerkesztett sztalaktitos (sejtgyám) közvetítésű félgömb kupola fedi. A minaret nem készült el. A forma ugyan a nyugati kontextusban idegen, anyaghasználatában viszont párhuzamot mutat a helyi hagyományokkal [4].

Annak ellenére, hogy a térségben évszázadok óta használt anyagról van szó, a szigorú amerikai építési szabályzat a vályogot instabil építőanyagok közé sorolta be, amelyet a heves esőzések ellen külön védőréteggel kell ellátni. Így a további épületeknél a koncepció sérült, a boltozatokat betonkéreggel burkolták, annak ellenére, hogy a vályog és a beton ilyen módon való együttes alkalmazása nem előnyös, hiszen a vályog túl gyorsan szívja el a beton kötéséhez szükséges vizet a betonkéregből és a későbbi használat során is folyamatosan kedvezőtlen a páraáramlás. A többletteher miatt a tiszta núbiai boltozási technika nem valósulhatott meg, hanem nehéz, fa mintaíveket kellett használniuk, illetve az alapok és a tartófalak megerősítése is szükségessé vált. A drága faszerkezetek és a szerkezeti módosítások a teljes építkezés költségét megsokszorozták, így a projekt csak részben valósult meg [5].



3. ábra: Mecset (háttérben a megerősített szerkezetekkel, Dar al-Islam falu, Új-Mexikó, USA, forrás: [4])

3. Boltozatok

Tanulmányunk középpontjában a Fathy által tervezett boltozatok állnak. Ahhoz, hogy természetüket pontosabban megismerjük, először az általános boltozatszerkesztési alapelveket vesszük át. Példákkal illusztráljuk, hogy a mester milyen tapasztalatok alapján konstruálta szerkezeteit.

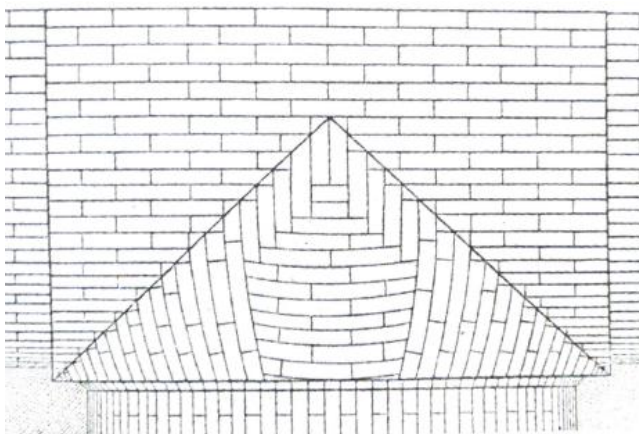
3.1 A „szokásos” falazási és szerkesztési technikák

3.1.1 Térlefedések formái és megtámasztásuk

A boltozatokban túlnyomóan nyomófeszültségek keletkeznek. Ezt úgy érhetjük el, ha vezérgörbéjük közel nyomásvonal alakú. megtámasztásukhoz vízszintes erők felvételére alkalmas támaszkialakításra is szükség van. Minél laposabb az ív, annál nagyobb támaszerő kell a vízszintes komponens felvételére.

Mind a boltozat, mind a támasztó szerkezet egyensúlyának a feltétele ugyanaz: az eredő erő hatásvonalára a szerkezeten belül kell maradjon, és akkor a legkedvezőbb, ha a keresztmetszet középpontjához közel fut. Az eredő függőleges komponense módosítható leterheléssel, pl. fiatornyokkal, hátfalazással, földemterheléssel. A vízszintes erők felvétele széles megtámasztó szerkezetekkel - falakkal, támpillérekkel, lekötésekkel, szomszédos boltozatokkal vagy boltívekkel történhet. Ha kicsi a rendelkezésre álló hely, a vonórúd alkalmazása a legjobb megoldás: két szomszédos feltámaszkodási pontot köt össze, azok vízszintes komponenseit egymással kiegyensúlyozza. A vonórúd a boltvállat támasztja meg, de nem csak annak vonalában futhat [7].

3.1.2 Kupás falazás

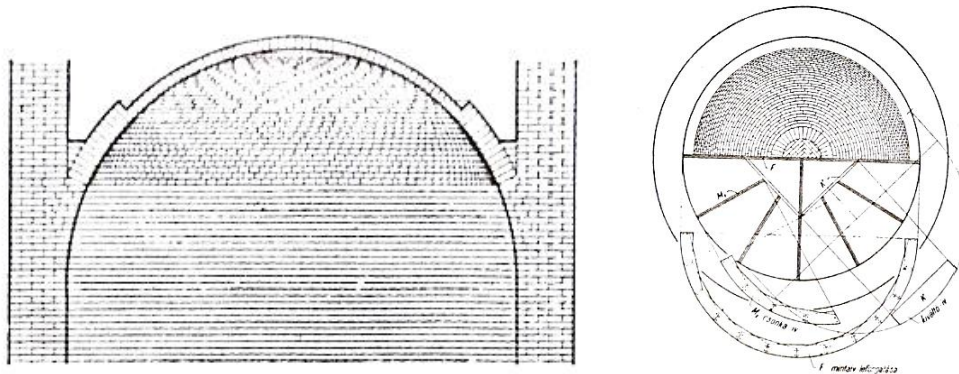


4. ábra: Kupás falazás
forrás: [9]

Már az ókori Mezopotámiában és Felső-Egyiptomban feltárt síroknál is találtak kupás falazásra emlékeztető mintákat: a téglák és a hézagok a tartófallal párhuzamosan helyezkednek el, mint pl. Neferti masztabájában [8]. A középkorban a dongaboltozatokat falazták kupásan. A boltozatot az ív bezárásáig és a habarcs megszilárdulásáig teljes felületű zsaluzattal kellett alátámasztani.

3.1.3 Gyűrűs falazás

Eleinte a kupolaboltozatok építésénél alkalmazták, majd, mint a csehboltozat egyik falazási módja, függőkupolaként is ismert. A gyűrűsen egymás felett elhelyezkedő hézagok a felületre merőlegesen, vagyis kúpfelületen helyezkednek el. E kúp csúcsa általában egybeesett a kupola felületének középpontjával. A meridián irányú feszültségek mindig nyomófeszültségek, kupola esetén egyértelműen ez a legelőnyösebb falazási mód. Építés közben mintáíveket igényel [7].

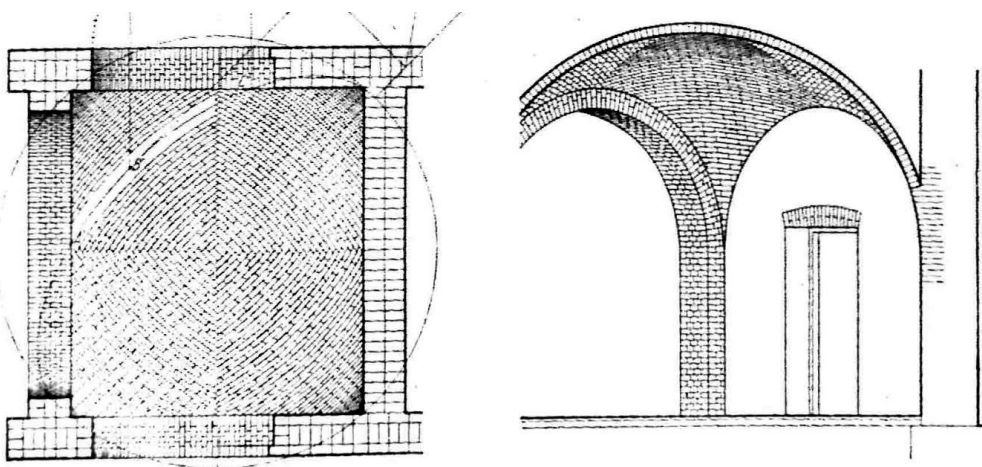


5. ábra: Gyűrűs kupolafalazás, forrás: [9]

3.1.4 Fecskefarkas (halszálkás) falazás

Az újkorban a keresztboltozatok építése kapcsán fejlesztették ki a fecskefarkas falazási módot. Ezzel tudták kiküszöbölni a drága kőbordákat és az ideiglenes megtámasztást – a boltozatot kézből tudták falazni állványzat nélkül. A keresztboltozat süvegét a sarkoknál kezdik el építeni és átlós irányban haladnak felfelé, a téglahézagokat pedig az élek érintőire merőlegesen alakították ki. A záradékoknál a fugák egymásra merőlegesek, halszáлка mintát rajzolnak ki. Ilyen módon lehetőség van az élekben erősítőbordák kialakítására.

Később rájöttek, hogy a cseh- és csehsüvegboltozat építésénél is egyszerűbb a fecskefarkas falazás alkalmazása [9].



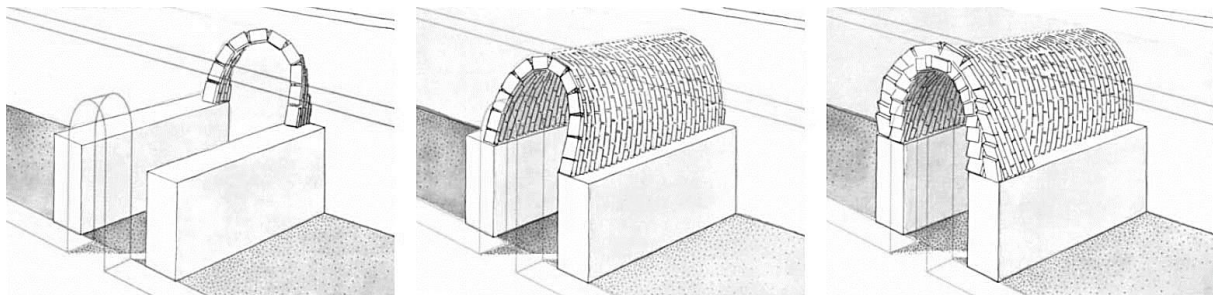
6. ábra: Csehboltozat fecskefarkas falazása, forrás: [9]

3.1.5 Núbiai boltozat (parabolaíves boltozat)

Ugyan esettanulmányunkhoz nem kapcsolódik szorosan, mégis Fathy egyik legtöbbet alkalmazott boltozattípusáról van szó, ezért fontosnak tartjuk bemutatni. Felső-Egyiptomban évezredek óta használják ezt a technikát, döntően vályogtéglából készítve/ falazva. A kupás falazással szemben itt az elemek hossz tengelye nem párhuzamos, hanem merőleges a tartófal tengelyére. A legnagyobb előnye a félköríves boltozattal szemben, hogy zsaluzat nélkül építhető. Az elkészült szerkezet könnyebb, mint egy félköríves, hiszen kisebbek és vékonyabbak a falazóelemek, illetve sokszor több szalmát is keverték az anyagukba [8]. Az egyiptomi speciális téglák a következőképp néztek ki: 25x15x5 cm, amelynek egyik (néha mindkettő) nagyobb felületű lapjába kettő darab átlós irányú vályút húztak az ujjukkal még nedves állapotban. Ezzel biztosították a nagyobb tapadófelületet, tapadóerőt a téglák és a habarcs között. A falazótéglák 23x11x5 cm-esek, sima oldallapokkal. A falazóanyag, a boltozótégla és a habarcs is közel megegyező szilárdsággal bírtak [8].

A sártégla csak minimális húzóerőt tud felvenni és döntően nyomóerő felvételére alkalmas, amelyek mértéke a szálanyag tartalomtól is függ. Különösen fontos tehát a szerkezeti forma megválasztása. A legideálisabb a nyomásvonal alakú vezérgörbe. Ez lehet kötélgörbe vagy a hozzá közel álló parabolaív. Hassan Fathy kőművesei az ívet szemre rajzolták fel a falra. Leírása szerint az ideális ív elsajátítása 2-3 évébe telik a mestereknek [10].

Ezzel a technikával lefedhető terek szokványos fesztávja 3-4 m. Mivel az ívek mindig az előzőre támaszkodtak, így a munka bármikor félbehagyható anélkül, hogy a szerkezet összeomlana.



7. ábra: A núbiai boltozat falazásának lépései, forrás: [8]

Az építés menete a harántfalak teljes magasságú felfalazása és a hátfal elkészülte után [8][10]:

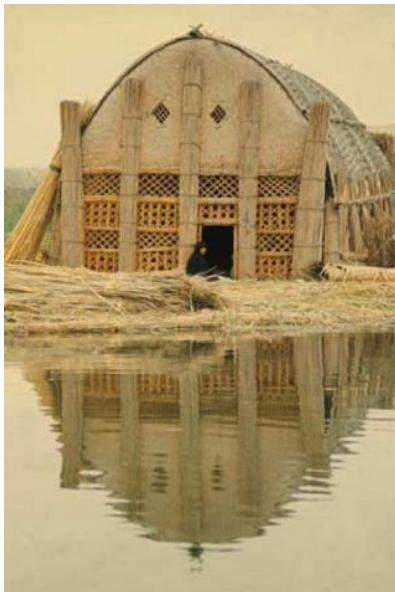
1. A hátfalra sárhabarccsal vékony rétegben durván kijelölik a vezérgörbét
2. A fogadó szerkezetet előkészítik, szükség szerint kiegyenesítik – Fathy alapján egy éles fejszével faragták le a vályogtéglafal tetejét, – majd az első téglák alá habarcssterítés készül
3. Az élére állított téglákat kissé a hátfal felé döntve kezdik el falazni, beleütögetve a habarcsba, úgy, hogy a nütölt lapja néz a végfal felé. Az ék alakú rést sárba rakott kő- és

cserépdarabokkal töltötték ki. Az ívek vízszintessel bezárt dőlésszöge tervezői döntés, általában 65° - 70° [2]. Minke kísérlete alapján, ha ennél kisebb a szög, a boltozat összeomolhat építés közben. Ha nagyobb, akkor az elemek lecsúszhatnak.

4. A már helyén lévő téglá aljához ék alakban sarat tapasztanak, mely a következő sor megfelelő felfekvését biztosítja. A sorok féltégla eltolással, kötésben készülnek.
5. A harmadik sornál kicsit több habarcsot használnak a kissé nagyobb hajlásszög eléréséhez.
6. A falazást így folytatják, míg az első ív össze nem záródik a végfalon.
7. Az egymást követő íveket a másik végfal eléréséig folytatják, mindig az őket megelőző ívre támaszkodva.
8. A végfal és az utolsó ív közti háromszöget kisebb ívekkel, kövekkel téglá-, vagy cserépdarabokkal és habarccsal töltötték ki.
9. Gyakran készült egy vagy több, az első boltozatra fekvő másodlagos boltozat, melynek ívei az előzővel ellentétes irányba dőlnek.
10. Az elkészült boltozatot sárhabarccsal borították a szél és a csapadék hatásaival szemben.

Fontos, hogy a rövidebb lapjukkal egymáshoz csatlakozó téglák között nincsen habarcs. Ugyanis a friss keverék akár 37 térfogat%-ot is zsugorodhat száradás során, amely a parabola torzulásához vezetne, befolyásolva a szerkezet állékonyságát. A téglák tehát szárazon érintkeznek [10].

3.2 Fathy tapasztalatai és a közel-keleti boltozatépítési hagyományok



8. ábra: Mudhif, Irak,
forrás:[51]

Egyes régészek szerint a legelső boltozatok Alsó-Egyiptom és Mezopotámia mocsárvidékeiről származnak. A prototípus felső, kb. felső $\frac{1}{3}$ -ukban egymáshoz kötözött nádkötegek voltak – a motívum korai egyiptomi falfestményeken és hieroglifákon fedezhető fel. Többek között a gizai nemesi temetőben, Neferi masztabájában találtak vörösre festett (a papirusznád színe) nádköteget imitáló falazatot, amely szintén a boltozási forma eredetére utal. Míg a Nílus völgyéből viszonylag hamar eltűntek ezek az építmények, a Marsh Arab-ok még a mai napig fednek csarnokméretű tereket ezzel a technikával, Irak területén. Ezek az úgynevezett *mudhif*-ek [8].

Ezeknek az épületeknek bizonyos része a külső felületén sárral voltak betapasztva, amelyek a következő fejlődési lépcsőt

jelentették. Az elv hasonló, mint az európai sövényfalas technika. A sártapasztás konzerválja a növényi szálakat, így tartósabbá teszi a szerkezetet.

Mivel a nád csak a mocsaras területeken volt elérhető, alternatív megoldást kellett találni. Ez volt a napon szárított vályogtégla. Majdnem az összes közel-keleti fennmaradt boltozat vályogtéglaból készült. Még az égetett téglá bevezetése után is inkább a vályogot részesítették előnyben, hiszen jóval olcsóbb volt az előállítás, nem igényelt kemenceépítést. A boltozatok széleskörű elterjedését az erdők és az építőfa hiánya is indokolja (mivel az égetéshez is kell valami anyag pl: fa).

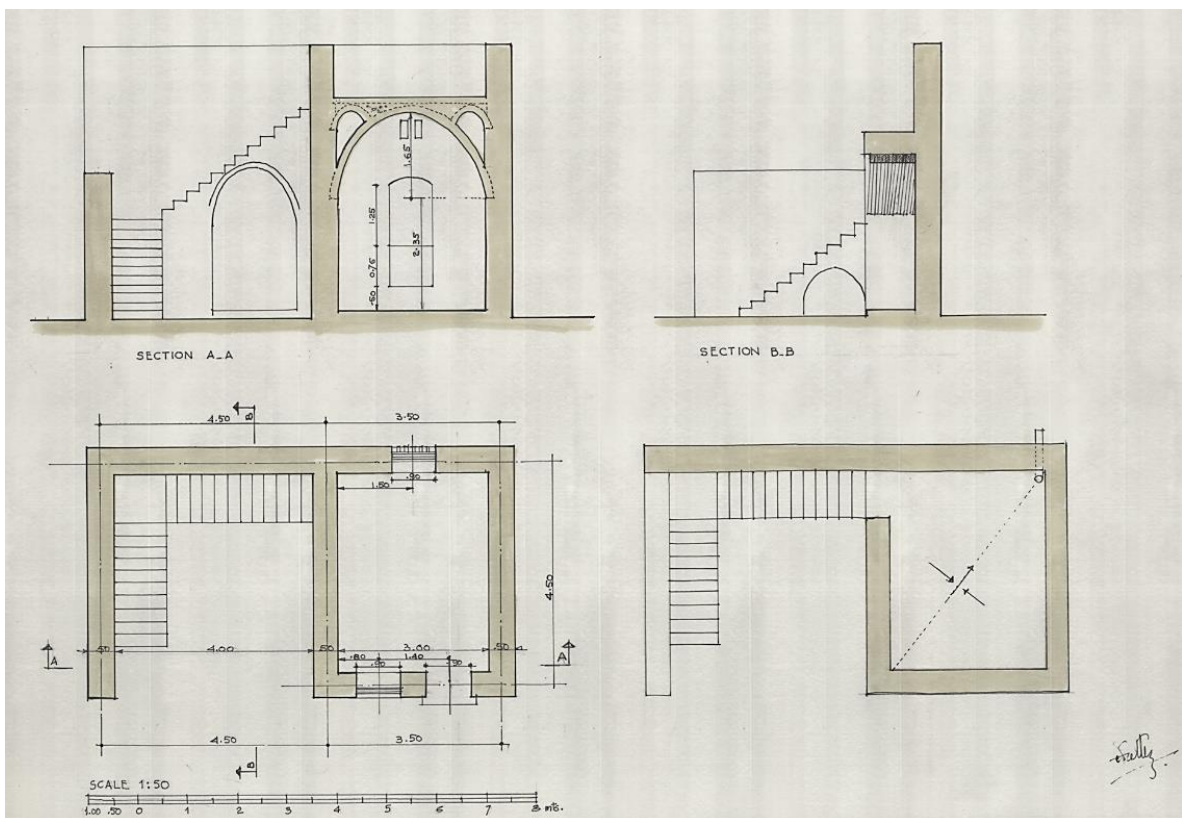
Három fő típusuk ismert: álboltozat, félköríves és a parabolaíves boltozatok, illetve kupolák, melyeknek falazási technikáit fentebb ismertettük.

Fathy asszuáni tanulmányútja során többek között a Fátimida-temető mauzóleumai, illetve a Szent Simeon kolostor szerkezetei szolgáltak tanulsággal. New Gurna épületeinél sok elemet felfedezhetünk az Asszuán-környéki núbiai falvak építészetéből is.



*9. ábra: A Fátimida temető mauzóleumai és egy sejtgým boltozat, Asszuán, Egyiptom
fotó: Vasáros Zsolt, 2017*

A Szent Simeon kopt (egyiptomi keresztény) kolostor Kr.e. VII. században épült. A 10. ábrán a szerzetesi hálókörlet egyik folyosója lászik, ahol a fő ív vállvonala felett húzódó másodlagos ívek nem csak a kikönnyítést szolgálják, de szellőzőcsatornaként is működik: az éjszakai friss levegőt a szerzetesek cellájába juttatják. Ehhez hasonló megoldásokat Fathy épületeiben is felfedezhetünk (pl. New Baris hűtött tárolói, vagy Garagus kerámiamanufaktúra szellőző falai). Egy másik tanulmányútján Touna el-Gebel nekropoliszát járta körbe. Lenyűgözve figyelte a több, mint 2000 éves (vályog) boltozatokat. Különösen a fotón látható lépcsőgyámolítást vélte tanulságosnak.



10. ábra: Inspirációk és terv

Fent, balra: Szent Simeon kolostor, Asszuán [8]

Fent, jobbra: Boltíves lépcsőgyámoltítás, Touna el Gebel (Ptolemaiosz korszak) [10]

Lent: Hassan Fathy épületterve [11]



11. ábra: Különböző közel-keleti épületek vonórudas rendszerei (Jeruzsálem: Sziklamecset, Kairó: 'Amr ibn al'As mecset, Damaszkusz: Takiyy al-Sulaymaniyya), forrás: [12]

A Chicago-i egyetem Luxor-i könyvtárában a Közel-Kelet építészetét, azon belül is a boltozatokat és kupolákat kutattuk. A könyvekben számos fotót és rajzot találtunk vonórudakkal kialakított épületekről. A fenti képsoron látható, hogy a karsú kőpillérekre rendszerint egy nagyobb keresztmetszetű boltívsor került. A felmenő szerkezetek, a födémekek és a tetők súlyából eredő terheket ellensúlyozó vízszintes támaszerők csökkentése érdekében alkalmazták a vonórudakat. Így a karsú oszlopok helyzeti állékonyságvesztésének veszélye minimalizálható volt. Ebből következtetünk rá, hogy az iszlám építészetben hasonló szerkezetek alkalmazása esetén elterjedt gyakorlat volt a sokszor díszesen faragott fa vonórúdrendszer kialakítása. Feltételezhetjük, hogy Fathy is ismerte ezeket a példákat, hiszen Kairóban nőtt fel és építészeti tanulmányainak részét képezte az iszlám építészet is.

3.3 Terepmunka során gyűjtött tapasztalatok

3.3.1 A Ramesszeum „núbiai” boltozatai



12. ábra: Ramesszeum, raktárhelyiségek, Luxor,
Egyiptom
forrás: saját fotó

Ahogy Fathy, úgy mi is meglátogattuk és tanulmányoztuk a Ramesszeum maradványait. A II. Ramszesz halotti templomegyütteséhez tartozó tároló kamrák 3200 éve épültek és kisebb-nagyobb sérülésekkel egy részük még ma is áll. Núbiai technikával, zsaluzat nélkül, közel parabola ívvel épültek. A fotón is látható, hogy a boltozóteglák vékonyabbak a falazóelemeknél és az alkotó irányú

fugákban nincsen habarcs. A boltozat négy rétegből áll, minden réteg az alatta lévőre támaszkodik, negyed téglával eltolással, az egymás mellett sorolt ívek pedig a boltvállakban fellépő vízszintes erőket egyensúlyozzák. Kiegészítő leterhelésnek is látszanak nyomai, melyek feltételezhetően inkább biztonsági, illetve felső felületképzési (tartóssági) szempontból voltak fontosak. A boltozatok közti fal négy téglával vastagságú, azaz nagyjából 100-120 cm széles, mely a kiegyensúlyozó támaszerőket képes biztosítani a tapasztalat szerint. A boltváll lépcsőzetesen van falazva az ívek fogadására. Vonórudakra utaló jeleket nem találtunk. Érdekes megfigyelni, hogy a végfalak eltűnése után a boltozat szakaszosan ment tönkre. A már beszakadt részek között elegendő egy - a 12. ábrán is látható - létra-szerűen kialakított, laposacélból készült karcú acélváz a megmaradt boltozati szakaszok alátámasztására. Az acél-szerkezetű gyámolítás hiányában is megállnak egyes szakaszok, mely az összeboltozódás miatt lehetséges. Ahogy azt a falazási technikák ismertetésénél leírtuk, a boltozat minden boltíve az előzőre támaszkodik, így ha a két végfal épségben maradt volna, a boltozat valószínűleg nem ment volna tönkre.

3.3.2 El Bagawat csehsüveg boltozatai



13. ábra: Ókeresztény temető, El Bagawat, Kharga-oázis, Egyiptom, fotó: Hegyi Dezső, 2019

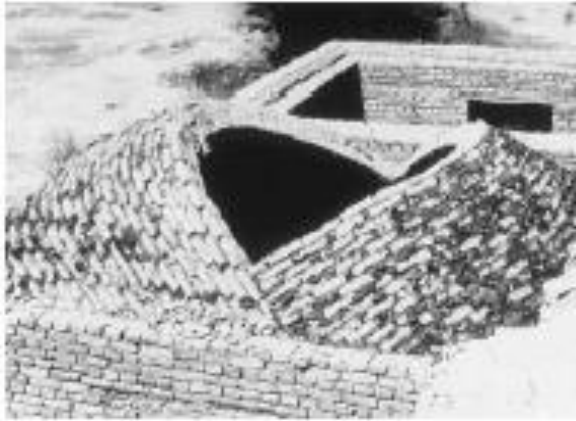


14. ábra: Különböző formájú mauzóleumok, El-Bagawat, Kharga-oázis, forrás: saját fotók

Az egyik legősibb keresztény temető a világon, amelyet a III-VII. században használtak és egyben az egyik legjobb állapotban fennmaradt síregyüttes a korszakból [13]. Mindenféle természetes védelmet nélkülözve az épületek ki vannak téve a homokviharoknak, a ritka, de heves esőknek és a szinte állandóan fújó erős szélnek, amelyek a természetes eróziót idézik elő. A tető felső felületén kiálló, a téglasorokat kiékelő kövek vélhetően a szél súrlódás erejét, így az erózió hatását is csökkentik. A többnyire négyzetes alaprajzú helyiségek csehsüveg boltozatokkal fedettek, amelyeket négy oldalon nyújtott ív - parabola vagy ellipszis - boltívek támasztanak. Egyes kupolák egyszerű gyűrűs falazással készültek, míg 14. ábra 3. fotóján látható kupola-maradvány ún. afgán vagy perzsi kupolafalazás [2] nyomait mutatja. Ez a technika hasonlóan a núbiaihoz, nem igényel ideiglenes alátámasztást. Kifejezetten négyzet alaprajzú terek lefedéséhez használták harang alakú lapos kupolák formájában. Az ívek a függőlegessel kb. 30°-ot zárnak be. Az

egymás feletti téglák horony-eresztékes kialakítással kapcsolódnak össze. Az Európában használt fecskefarkas falazáshoz hasonlít leginkább, a núbiai technikával könnyen kombinálható.

A temető kápolnáin núbiai boltozatok fedezhetők fel.



15. ábra: Az afgán kupola építése, forrás: [2]

3.3.3 Mecset, New Gourná



16. ábra: Mecset, New Gourná, Egyiptom,
fotók: Hegyi Dezső, 2019



A mecset New Gourná főterén áll a Khannal (szeráj) szemben. Az átlagos New Gourná-i épületekkel ellentétben - feltehetően a méretei és a jelentősége miatt - nem csak vályogból, hanem részben mészkőből és égetett téglából épült. A tetőt alkotó kisebb kupolák, illetve a habarcs viszont sárból készült. Az utóbbi évtizedek talajvízszint emelkedésének az épületen is látszanak a nyomai (részletesen lásd. az esettanulmányban). Az udvarból liwan-ként kialakított imaterem gömbsüveg boltozatai nagy keresztmetszetű falazott kőpillérekre támaszkodnak. A központi tér kupolája sejtgyámokkal van a négyzet alaprajzra szerkesztve. A nagyjából négyzethálóban kiosztott pillérsorok között enyhén csúcsíves boltívek gyámolítják a közéjük szerkesztett csehsüveg boltozatokat. A tetőn látszik, hogy a csehsüvegek között feltöltés van, amely a boltozatok leterhelését is segíti, valamint a karbantartás miatt szükséges járőfelületet biztosítja. A tető csakúgy, mint a falak, eredetileg vályogvakolattal voltak fedve az időjárás viszontagságaival

szemben. A karbantartás hiánya miatt a felületképzés sok helyen hiányzik. A talajvíz emelkedése és feltehetően az alkalmazott falazóanyagnál gyengébb nyomószilárdságú habarcs nedvesség hatására történő kúszása miatt komoly tartószerkezeti problémák jelentkeztek. Több helyiségben ujjnyi vastag, nagyjából meridián irányú repedések keletkeztek a boltozatokon és függőleges repedések a falon. Az épület károsodásának okait vizsgálni egy külön kutatási téma lehetne.

3.3.4 Khan, New Gourná



17. ábra: Khan, New Gourná, forrás: saját fotók



A Khan épülete New Gourná főterén, a város középpontjában helyezkedik el, a Mecsettel szemben. Az épület a város építésének első évében, 1945-ben épült, túlélte a várost ért 1947-es árvizet. Az épület eredetileg a városba érkező mesteremberek szálláshelyül és műhelyül szolgált, akik a város lakóit tanították iparművességre [10]. Azt remélték, hogy a Khanban készített kézműves termékeket a főútról a városba érkező turisták megvásárolják, ezzel is gazdagítva a falut [5].

Az utca felőli traktust gyűrűsen falazott csehsüveg boltozatok sora fedi. A mögöttük lévő műhelyeket vagy raktárakat núbiai boltozatok borítják az udvar felőli végükön fallal lezárva. Különböző okok miatt a főter felőli árkádsor tartószerkezete megrongálódott. New Gourná legfrekvenciáltabb helyén lévő és egyik legelső épületeként úgy gondoltuk, hogy a nagymértékű állagromlás okait, az eddigi beavatkozások hatását és a javítási lehetőségeket részletesebben megvizsgáljuk. Az eredményeket az esettanulmányban mutatjuk be.

4. Vályog

A New Gourna projekt és Hassan Fathy munkásságában kulcsfontosságú építőanyag a vályog, azon belül is a vályogtégla. Ebben a fejezetben a vályog alapvető tulajdonságairól végzett kutatásunk eredményeit foglaljuk össze.

4.1 A vályog, mint építőanyag

A vályog vagy vályogtalaj törmelékes üledék, amely agyag, iszap és homok keverékéből áll. Néha tartalmaz nagyobb aggregátumokat, mint kavicsok, kőzúzalék. A műszaki tudomány átmérő szerint definiálja a különböző összetevőket: az agyag a 0,002 mm-nél kisebb, az iszap 0,002-0,06 mm, a homok 0,06-2 mm és a 2 mm-nél nagyobbak a kövek, illetve kavicsok. Mint a betonban a cement, úgy a vályogban az agyag szolgál kötőanyagként. A többi összetevő pedig az adalékanyag. Attól függően, hogy melyik szemcsefrakció mennyisége a domináns, beszélünk agyagos vagy kövér vályogról, iszapos vagy félkövér, illetve homokos vagy sovány vályogról [2].

Építési vályog előállításához tulajdonságmódosító anyagok adhatók a kitermelt talajhoz. Ezek lehetnek szilárdságot növelő (szalma, nád), hőszigetelést növelő (szalma, nád, fűrészpor stb.) és ún. stabilizáló (mész, cement) anyagok. A kövér agyag egyik fő tulajdonságmódosító anyaga a homokos-kavics (0,125-4 mm szemcseméretű), amely stabilizálja, azaz soványítja a keveréket. Szalma hozzáadásával (legfeljebb: 25-30 térfogat%) nő a vályogkeverék húzószilárdsága és nem csökken jelentősen a nyomószilárdsága [14].

A New Gourna projektben tehéntrágyát használtak a vályog vízállósága és vízzel szembeni ellenálló képességének javítására [10].

4.2 A vályog létjogosultsága száraz, sivatagi környezetben

„A ház lehet poros, koszos, de ez nem a vályog hibája. Csak jó tervezés és egy seprű kell a szép, tiszta, élhető házhoz”.

Hassan Fathy

Majdnem minden forró-száraz és mérsékelt éghajlaton a legelterjedtebb építőanyag a föld és a vályog. Manapság az emberiség egyharmada él vályogházban. A fejlődő országokban ez a népesség felét jelenti. Az ipari anyagokkal (acél, vasbeton, égetett téglá, vázkerámia) lehetetlen kielégíteni a folyamatosan és hirtelen növekvő lakáscélú építkezéseket, különösen a szegény területeken. A föld viszont majdnem mindenhol helyben elérhető és kalákában, különösebb szaktudás nélkül építőanyagként használható. Nem terheli a környezetet, hiszen ideális esetben a saját telekről vagy a szűkebb környezetéből kitermelhető [2].

A száraz éghajlatnak köszönhetően a csapadék sem jelent nagy problémát. Ha esik az eső, az viszonylag kevés és rövid ideig tart. A levegő nem hűl le ennyi idő alatt, így a lehullott vízmennyiség hamar elpárolog. A vályog pedig megfelelő karbantartás mellett sértetlenül áll tovább.

Az **I. mellékletben** található diagramok a terület éghajlatáról adnak tájékoztatást. Csapadék csak októberben, esetleg decemberben várható, mennyisége mindössze 1 mm. A relatív páratartalom a nyári hónapokban a legalacsonyabb, 30% körül mozog, a legmagasabb pedig a téli hónapokban 50-60% között. Az átlagos napi hőingás nagyságrendileg 17°C. Fagy nem jellemző, a leghidegebb hőmérséklet januárban 5°C, a legmagasabb pedig június-augusztus hónapokban akár 50°C. A felhasznált építőanyagoknak tehát extrém magas hőterhelést kell kibírnia nyáron.

A talajvíz és annak ingadozása viszont komoly problémát jelenthet, mint ahogy azt a New Gourna-i házaknál is tapasztaltuk. A mai magyar gyakorlatban is megszokott alapozás és lábazati kialakítással, vízszigeteléssel azonban könnyedén lehet ellene védekezni.

Egyes folyómenti területeken 20-50 évente árvizek is előfordulhatnak. Ahogy azt Fathy is kijelentette, kellő vastagságú szerkezettel és megfelelő alapozással a vályogház kibírhatja az árvizet. A túlélést viszont nagyban befolyásolja az árvízszint magassága, illetve időtartama. New Gourna építése közben Fathy a saját bőrén tapasztalta meg az árvíz hatását. A gát (szándékos) áttörése után az épületek fél méter magas vízben álltak napokig. A víz több mint 10 nap után tűnt el a területről, hatalmas repedéseket hagyva maga után a talaj felszínén, illetve a frissen épült falakon [10].

Árvíz ellen, a parasztok által is ismert módszer szerint, a helyesen megválasztott építési területtel, rendszerint dombokra építéssel lehet védekezni. New Baris már az oázis vízlelőhelyétől messzebb, magaslaton épült és azóta sem mutatkoznak felázási problémák.

4.3 Általános tulajdonságok, szilárdsági adatok

4.3.1 A vályog, mint nem standardizálható építőanyag

A vályog, mint építőanyag nehezen szabványosítható. Minden helyszínen fellelhető talaj eltérő minőségű, így a belőle készült építési vályog is. Nem standardizálható olyan módon, mint a megszokott építőanyagaink, pl. beton, vasbeton, acél, égetett kerámiatermékek. Minden esetben helyszíni vagy laboratóriumi vizsgálatokkal kell megállapítani az alapanyag minőségét és az építőanyag-keverék receptúráját a kapott adatok alapján. A keverékek kialakítása nagyrészt a helyi anyag adottságaitól függ és tapasztalati úton történik. Ezzel az egyik probléma az, hogy a megfelelő anyag- és vályogépítés ismerettel rendelkező generációk tudása fokozatosan elvész.

Jelenleg kevés országban érhető el vályogépítést szabályozó rendelkezések és azok nagy része is csak az utóbbi pár évtizedben született. Németországban az 1951-1971 között volt érvényben a DIN vályoggal foglalkozó része [15], majd 1998-ban a Lehmbau Regeln című szabályozást vezették be, illetve ezeket az EUROCODE részeként próbálják tovább éltetni, de 2013-ban újra érvénybe lépett három DIN szabvány. A német nyelvterületek mellett Új-Zélandon, az USA-ban, Peruban, Kínában, Equadorban, Indiában, Nepálban, Ausztráliában ismertek szabályozások [16].

A szabályozások megszületéséig irodalmi adatokra és a tapasztalatra támaszkodhattak az építők, erre épültek a szabványok is, kiegészítve a helyi adottságokra való adaptációval. A továbbiakban a kutatásunk szempontjából legfontosabb tulajdonságokat ismertetjük.

4.3.2 Nyomószilárdság

Az építési vályog rendszerint 2-5 MPa nyomószilárdsági értékkel rendelkezik. A falak megengedett nyomófeszültsége a DIN 18954 német szabvány szerint 0,3-0,5 Mpa [16].

A szerves rostok jelentős mértékben - vályog testsűrűségének csökkenésének arányában - rontják annak egyirányú nyomószilárdságát és csak kis mértékben növelik a húzószilárdságát. Magas nyomószilárdsági követelmény esetén elvileg zérus töltőanyag mennyiség is megfelelő. A vályog repedésérzékenysége miatt azonban szükséges szálal anyagot adni a keverékhez [17]. A falazat szilárdsági, alakváltozási jellemzői nagyban függenek a felhasznált anyagkompozíciótól, a víztartalomtól, a falazóelem méretétől, száradási időtől. Még az ugyanolyan körülmények között készített vályogminták tulajdonságai is nagy szórást mutatnak.

| <i>Nyomószilárdság</i> | |
|---|-------------|
| Vályogtéglákra ajánlott alsó határ ^[18] | 2,4 MPa |
| Különböző vályogtéglákra kapott törővizsgálatokból ^[2] | 3,5-6,1 MPa |
| Három vályogtéglából alkotott falazat törővizsgálatából ^[14] | 2,5-3,9 MPa |
| 20×40×8 cm geometriájú vályogtéglák törővizsgálatából ^[19] | 0,8-1,8 MPa |
| 5×10×10 cm geometriájú vályogtéglák törővizsgálatából ^[20] | 0,5-3,2 MPa |

1. táblázat: Vályogfalazatok javasolt nyomószilárdsága

4.3.3 Zsugorodás

A kövér agyag nagy száradási zsugorodású, ezért az ebből készült elemeknél, vagy falaknál a kiszáradás során repedések keletkezhetnek, amelyek rontják a szerkezet teherviselő képességét. Ekkor „soványításra” maximum 8 mm szemnagyságú homokos-kavicsot alkalmaznak, vagy gipszet adagolnak hozzá.

| <i>Agyafajta</i> | <i>Testsűrűség (kg/m³) [20]</i> | <i>Zsugorodás (%) [21]</i> |
|-----------------------|--|----------------------------|
| Homokos, löszös agyag | 1750 | nincs adat |
| Sovány agyag | 1850 | 1-2,5 |
| Félkövér agyag | 1900 | 2-3,5 |
| Kövér agyag | 2000 | 3-5 |
| Nagyon kövér agyag | 2200-2400 | 4-10 |

2. táblázat: Az agyagfajták testsűrűsége és zsugorodása [14]

4.3.4 Kúszás

A vályognál alapvetően kétféle kúszást különböztetünk meg. Az építési kúszást, illetve a „vizes” kúszást. Előbbi a betonnál is ismert, már az építés közben a száradási zsugorodással egyidőben, állandó terhelés hatására fellépő, időben változó alakváltozás, amely kezdetben gyorsabb, később lassul, évekkel később pedig nullához közelít.

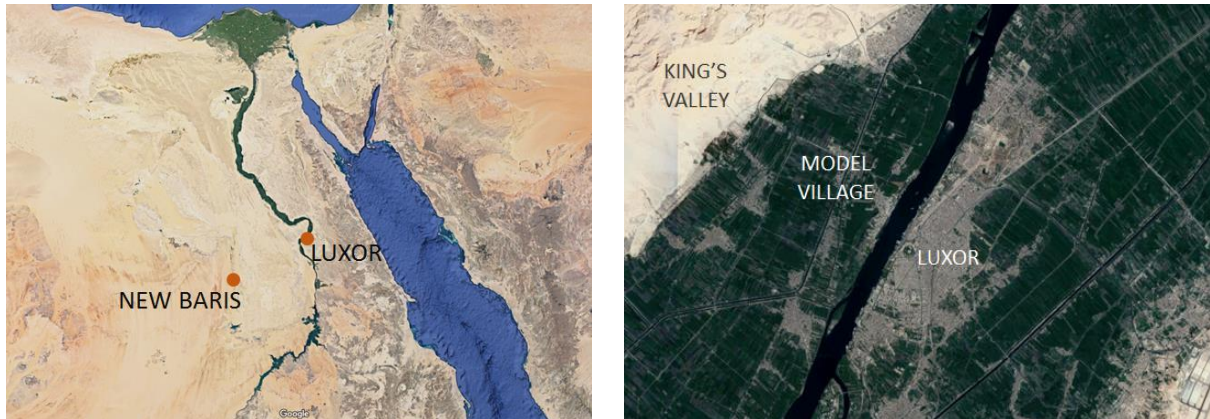
Utóbbi pedig, nedvesség hatására fellépő alakváltozás, amely a szemcsék duzzadásából és zsugorodásából adódik a fához hasonlóan. Minden nedvesedési és száradási ciklusban változik kicsit a szemcseszerkezet, így idővel tartós alakváltozáshoz, így külponztosság-növekményhez vezethet. Az amerikai szabvány a következőképp írja le: az építés utáni ülepedési folyamatot követően, a vályogtéglá kúszása normál terhelés alatt valószínűleg végtelen lesz, mindaddig, amíg szárad. A nedvesség visszatérése a vályog pórusaiba azonban a részecskék további átrendeződését és az agyagrészecskék duzzadását okozhatja. A kúszás nagysága függ a nedvesség mennyiségétől és a vályog agyagtartalmától, illetve annak összetételétől [23].

4.3.5 Vízállóság

A vályog nem vízálló. A szerkezeteket a csapadékvíztől és a talajban valamint a talaj felszínén áramló vizektől óvni kell. Ahogy azt egy régi népi bölcsesség is tartja hazánkban, a vályogháznak kalap és csizma kell, vagyis nagy ereszkinyúlás és megfelelő lábazat. Egyiptomban más a klíma így más kérdések merülnek fel, amelyekkel az esettanulmányban részletesebben foglalkozunk. A vízállóság kérdését Hassan Fathy is vizsgálta. Könyvében dr. Mustapha Yehya kísérletét említi meg: különböző faltesteket vizsgált vízszigetelő anyaggal

kevert és tulajdonságmódosító nélküli vakolatokkal felületkezelve, illetve vízszigeteléssel és anélkül. A faltesteket 6 héten keresztül nedvesítési- és száradási ciklusoknak vetette alá, majd figyelte a változásokat. A sima szalmával kevert vályogtéglából álló fal, kezeletlen vakolattal 67 nap után dőlt össze. A vízszigetelő anyaggal kezelt vakolattal rendelkező falak 86 nap után külpontos nyomás és az aznap fújó erős szél miatti, falsíkban keletkező hajlítófeszültség miatt mentek tönkre [10].

4.4 Anyagvizsgálatok



18. ábra: balra: a mintavétel helyei, Egyiptom: New Baris és Luxor, jobbra: Luxor és New Gourna (Model Village) viszonya térképen, forrás: Google Maps

Márciusi terepmunkánk során az egyiptomi vályogépületek széles skáláját láthattuk testközelből a fáraók korától napjainkig. Míg a történeti épületeknek leginkább a szerkezetét elemeztük, az újabb, kissé már megrongálódott épületeknél az anyagminőségre is kíváncsiak voltunk. Két helyszínen vettünk mintát a lehullott építőanyag darabokból.

Az általunk alkalmazott anyagvizsgálatok általános esetben az építkezés megkezdése előtt, a helyszínen, a felhasználni kívánt talaj minősítő vizsgálatai. Esetünkben, mivel az anyagot laborban vizsgálni nem volt lehetőségünk, az alapvető mechanikai tulajdonságok meghatározásához az alább bemutatott módszereket használtuk Egyiptomban. Az alapvizsgálatoktól eltérően mi nem a fellelt talajt, hanem a már kész építőanyagot vizsgáltuk, amelyet a készítő receptúra alapján keverték: javíthatták a homok és agyag-iszap tartalom arányát, szalmát, töreket keverték bele.

4.4.1 Színvizsgálat (ásványi szennyeződések vizsgálata)

A szín az agyag ásványi eredetéről árulkodik, ami az építőanyag szempontjából fontos lehet, melyet Minke professzor és Molnár Viktor is részletesen ismertettek. Esetünkben a következőket tapasztaltuk:







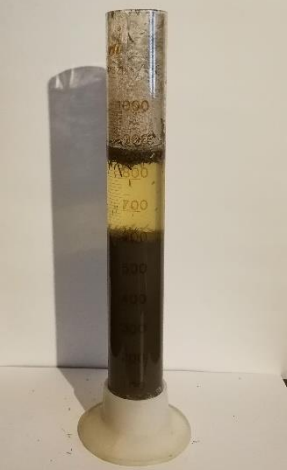


A New Barisban talált téglá kissé vöröses színű, amelyet a Kharga-oázis ásványi összetételének köszönhet. A szakirodalom a sivatagi oázisok vörösesbarna mésztartalmú, agyagos talajai közé sorolja a területet [24][25]. A vöröses-barna elszíneződés vasoxid tartalomra utal, mely nagy szilárdságú vályogra enged következtetni [21]. New Gournában a minta színe sokkal sötétebb, szürkés-barnás. Ennek magyarázata, hogy a Nílus ártéri területén fekszik, ami éppen azért tudott benépesülni, mert a folyó, rendszeres áradásaival termékeny talajjal, iszapos agyaggal töltötte fel a területet, vagyis a kitermelt építőföldnek is más színezetet ad. Molnár szerint a szürke szín kevés mész jelenlétére utal, a barnás pedig szervesanyag tartalomra. Mindkettő szilárdság csökkenéshez vezet.

4.4.2 Hidrometrálás – agyag-iszap tartalom ülepitéses vizsgálata

Az ülepitéses vizsgálattal a minta közelítő homoktartalmát, illetve agyag-iszap tartalmát térfogatszázalékuk arányában lehet meghatározni. A vályogfalhoz megfelelő keverék agyagtartalma általában 25-30%. A mintát, lehetőleg egy hosszúkás üvegedényben, vízzel kell felönteni és rázással egyenletesre keverni. A leülepedett mintát egy óra múlva ismét felrázzuk, majd az így leülepedett mintát mérjük [26]. Skálázott mérőedény esetén az agyag-iszap réteg feletti (h_1) és alatti (h_2) értékből:

$$A - I V\% = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100$$

Az agyag-iszap tartalom ismeretében következtethetünk a minta szemeloszlására, mely közvetlenül kihat az építőanyag szilárdságára is.

| | <i>I. minta</i> | <i>II. minta</i> | <i>III. minta</i> |
|------------------------------|---|--|---|
| Építőanyag minta |  |  |  |
| Minta előkészítése |  |  |  |
| Ülepítés hidrometráló csőben |  |  |  |

3. táblázat: Az ülepitéses vizsgálat szemléltetése, forrás: saját vizsgálat

Az ülepítési vizsgálat a következő eredményeket adta:

| | <i>Minta I.</i> | <i>Minta II.</i> | <i>Minta III.</i> | |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Minta megnevezése | sötétbarna tégl | vöröses színű tégl | vöröses vakolat | |
| Mintavétel helye | New Gourna, Model Village | New Baris Village | | |
| Leolvasás | teljes ülepedés után | teljes ülepedés után | 1 óra elteltével | teljes ülepedés után |
| Vizsgált anyag összesen | 690,00 cm ³ | 635,00 cm ³ | 650,00 cm ³ | 650,00 cm ³ |
| Szálás anyag | | | | |
| mérőedény h1 | 900 | 890 | 930 | 950 |
| mérőedény h2 | 800 | 860 | 800 | 920 |
| mérőedény h3 | | 605 | 520 | |
| mérőedény h4 | | 600 | 510 | |
| V szálásanyag (h1-h2) | 100,00 cm ³ | 35,00 cm ³ | 140,00 cm ³ | 30,00 cm ³ |
| Szálás anyag tartalom (SZ V%) | 14% | 6% | 22% | 5% |
| Homok | | | | |
| mérőedény h1 | 360 | 415 | 410 | 250 |
| mérőedény h2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| V homok (h1-h2) | 360,00 cm ³ | 415,00 cm ³ | 410,00 cm ³ | 250,00 cm ³ |
| Homok tartalom (H V%) | 52% | 65% | 63% | 38% |
| Agyag-iszap | | | | |
| mérőedény h1 | 590 | 600 | 510 | 620 |
| mérőedény h2 | 360 | 415 | 410 | 560 |
| | | | | 560 |
| | | | | 250 |
| V agyag-iszap (h1-h2) | 230,00 cm ³ | 185,00 cm ³ | 100,00 cm ³ | 370,00 cm ³ |
| Agyag-iszap tartalom (A-I V%) | 33% | 29% | 15% | 57% |

4. táblázat: Ülepítési vizsgálat eredménye, forrás: saját vizsgálat

Az első minta, agyag-iszap tartalma 33 térfogat%, homoktartalma 52 térfogat %, szervesanyag tartalma pedig 14%. A második mintának kicsit eltérők az arányai: 29 térfogat % az agyag-iszap tartalom, 65% a homok és csupán 6% a szerves anyag. A vakolat esetén még nagyobb volt a két mérési időpont közti eltérés. Az első leolvasáskor 22% szervesanyag-tartalom volt leolvasható, 24 óra elteltével viszont már csak 5%. A szalma-adalék tehát elázott és a homok, illetve az agyag-iszap közé keveredett. Ésszerű közelítéssel élve a tényleges agyag-iszap tartalom a táblázati adatok átlaga alapján 36% körül van.

Megjegyezzük, hogy a vizsgálat nem labor körülmények között zajlott és csak szűrőpróbaszerű ellenőrzésnek fogadható el. A vizsgálati eredmények viszont a szokványos vályogtégla és habarcs összetételt mutatják.

Fathy számára is alapvetés volt, hogy a húzószilárdságot a szalmával növelik, a kötőanyagot pedig min. 30% homokkal kell stabilizálni, azaz soványítani. Könyvében Colonel Debes (II.

melléklet) és Dr. Mustapha Yehya (lásd. Vízállóság) egyetemi professzorok kísérleteit szemlélteti a receptúra arányainak meghatározásának alapjául [10].


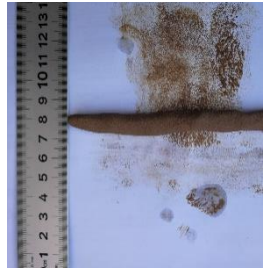






4.4.3 Gyúrópróba

A szilárdsági tulajdonságok meghatározásához azonban az agyag-iszap tartalom ismerete nem elegendő. Megfelelő eszközök és körülmények hiányában külön az agyag és az iszap szemmel látható módon nem különült el. A gyúrópróba a talajfélék gyors, helyszíni felismerésének hazai módszere. A talajból egy evőkanálnyit a tenyerünkbe veszünk, megnedvesítjük és tésztaszerűre gyúrjuk. A mintából először golyót, majd fél centiméter vastag sodratot próbálunk készíteni.

A homoktalajból vett minta anyaga már golyóformálás közben szétesik. Az agyagos homoktalajból golyót lehet formálni, de nem sodorható hengeressé. A vályogtalajból golyó és sodrat készíthető, de gyűrűbe nem hajlítható anélkül, hogy meg ne törne. Az agyagtalajból golyó formálható, sodorható, gyűrűbe hajlítható [26].

A gyúrópróba eredményéből a talaj kötőképességéről kapunk tájékoztatást. Minél nagyobb mértékben van jelen az agyag, annál nagyobb a kötőképesség és minél nagyobb a homoktartalom, annál könnyebben esik szét az anyagminta.

A kötőerő meghatározásához gyúrópróbát is végeztünk. Mindkét téglamintából megállapítható, hogy száraz állapotban kezünkben morzsolva nehezen nyomható össze, apró szemcséjű homokot és finom porszemeket és érzünk benne. Nedvesen síkos, csúszós, kezünk foltos maradt tőle. Gyúrva golyót, hengert, gyűrűt, illetve “percet” is tudunk belőle formálni. A Búzás-féle talajfélék érzékszervi meghatározására szolgáló táblázat [27] alapján az agyagos kategóriába sorolhatjuk.

| | <i>Golyóformázás</i> | <i>Henger</i> | <i>Gyűrű</i> | <i>Perec</i> |
|------------------|---|---|--|---|
| <i>I. minta</i> |  |  |  |  |
| <i>II. minta</i> |  |  |  |  |

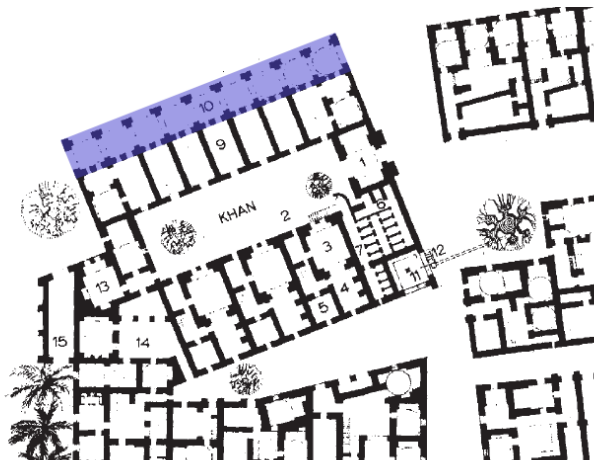
5. táblázat: A gyúrópróba eredménye, forrás: saját vizsgálat

5. Esettanulmány

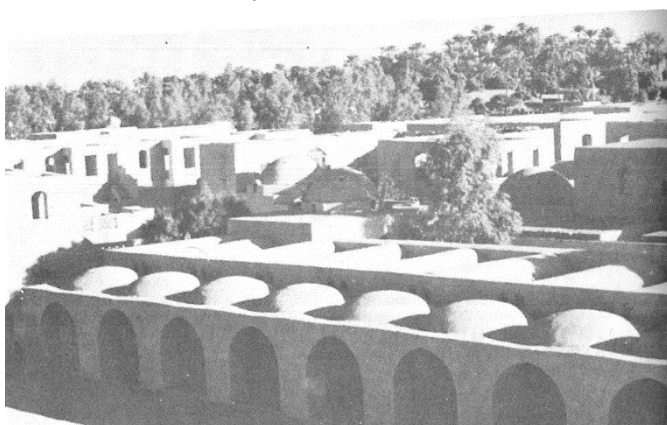
5.1 A Khan bemutatása



19. ábra: A Khan épülete, New Gourna, forrás: [5]



20. ábra: Khan, A modellezett árkádsor kiemelve, forrás: [5]



21. ábra: Khan árkádsora 1969-ben, forrás: [10]

A Khan homlokzata a mecset felé néz, ahol egy árkádsor helyezkedik el. Az árkádsor mögött találhatóak a kézműves műhelyekbe nyíló ajtók. Az árkádsor csehsüveg kupolák sorolásából áll. A kupolák a homlokzat felőli oldalon pillérekre, a Khan felőli oldalon falakon nyugszanak. A csehsüvegek vályogtéglából készültek, az árkádsor lábazatai pedig a közeli mészkőbányából hozott mészkőből, amelyeket vályoghabarcsba falaztak/ raktak. Az árkádsor alapozását nem tártuk fel, így kialakítására csak következtetni tudunk. Hassan Fathy három alapozási lehetőséget ír le könyvében [10].

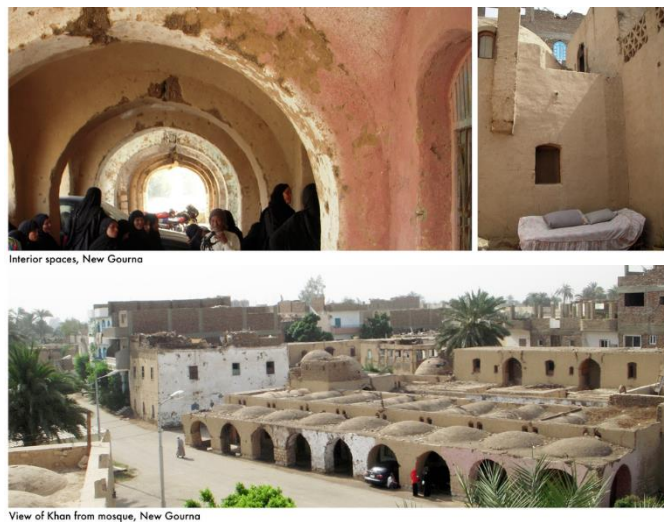
1) Három méter mély, fúrt lyukakba földbeton szórásával cölöpök kialakítása, amelyek között teherátadó falazott ívek találhatóak. A földbeton adalékanyaga kavics, tört kövek és kerámia darabok, égetett téglák, a kötőanyaga homokkal stabilizált földhabarcs (agyag-iszap keverék).

2) A falak alatt 1-1,2 méter mély árkok kiásása és ennek feltöltése az 1) pontban ismertetett összetételű földbetonnal.

3) A talajkonszolidáció hatásának minimalizálása a talaj elötömörítésével.



22. ábra: A színház feltárt alapozása, forrás: saját



23. ábra: A Khan állapota 2010-ben, forrás: [28]

A 2) lehetőség a legvalószínűbb az árkádsor esetében, annyi eltéréssel, hogy földbeton helyett mészkövet és vályoghabarcsot használtak. Erre engednek következtetni a környező, már feltárt alapozású épületek (pl: Mecset, Színház). Fathy is megemlíti, hogy a város első megépült épülete azért készült csak téglalapozással, mert még nem állt rendelkezésükre mészkő [10].

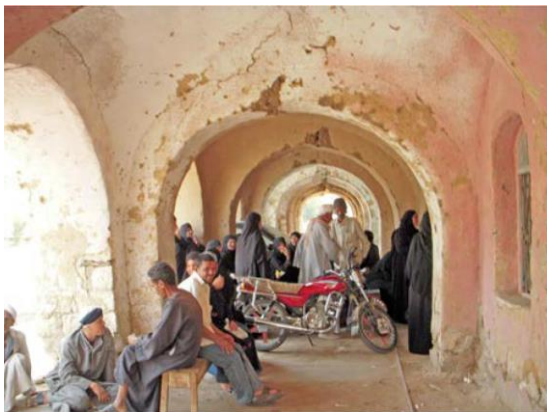
A Khan épülete mára nagyon rossz állapotban van. Az árkádsor csehsüveg kupolái több helyen beszakadtak, a pillérek kifelé dőlnek, jelezve, hogy a szerkezet nagy alakváltozásokon ment keresztül. Az UNESCO felismerte Fathy modellfalujának jelentőségét és megőrzésének / rekonstrukciójának szükségességét. 2009-ben egy projektet indított a város állapotának felmérésére és lehetséges rekonstrukciójának kidolgozására és végrehajtására [28].

2010-ben több felmérést végeztek New Gournában és már ekkor megállapították, hogy az árkádsor rossz állapotban van és mielőbbi rekonstrukciója szükséges. 2011-ben a *Save the Heritage of Hassan Fathy* egyesület az UNESCO támogatásával stabilizálni próbálta a Khan előtti árkádsort. Az árkádsor szélső boltmezője kidőlt, így ezt újraépítették kisméretű tömör égetett téglából, illetve támpilléreket helyeztek el három állásonként, hogy megállítsák a pillérek kifelé dőlését. A későbbiekben, mivel a támpillérek által biztosított vízszintes megtámasztás nem bizonyult elégségesnek, az árkádsor teljes hosszoldalán végigfutó, 35-40 cm vastag, kisméretű tömör téglából falazott támfalat helyeztek el. Mivel az építése leállt, az utolsó két állás szabadon maradt [29].



24. ábra: A Khan felújítás utáni állapota 2011-ben, forrás: [29]

2019 márciusában helyszíni bejáráson voltunk, ahol az árkádsor jelenlegi állapotát megvizsgálhattuk. Időközben a támfal által meg nem támasztott szélső mezőben ugyancsak beszakadt a csehsüveg boltozat. A boltívek látványosan megsüllyedtek és a pillérek is jobban dőlnek kifelé, mint az 2010–11-ben tapasztalható volt.



25. ábra: A Khan állapota:

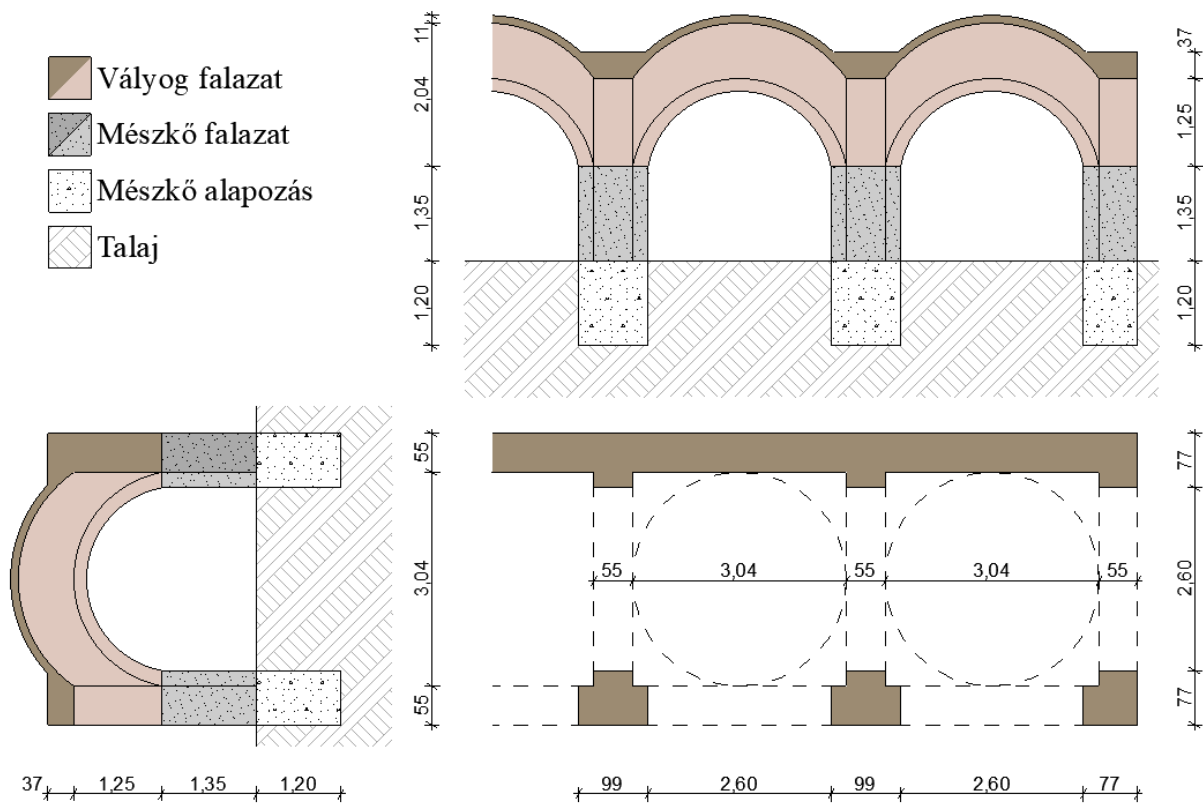
bal: 2010-ben, forrás: [38], jobb: 2019-ben, forrás: saját fotó



26. ábra: Kifelé dőlő pillérek,
forrás: saját fotó

A támfal az árkádsorral együtt dől kifelé, amely a stabilizáló hatását kérdésessé teszi. A téglából újonnan épített állás és az árkádsor többi része között nagyobb repedések láthatók, azaz a két anyag nem dolgozik együtt.

Látható tehát, hogy a 2011-es beavatkozások nem állították meg az árkádsor folyamatos állapotromlását, hanem vagy nem befolyásolták, vagy gyorsították a folyamatot. A következőkben arra a kérdésre keressük a választ, hogy pontosan mi okozza az árkádsor állapotromlását, milyen hatással voltak rá a 2011-es beavatkozások és hogy lehet megmenteni a szerkezetet.



27. ábra: Az árkádsor eredeti geometriája, helyszíni mérések szerint

5.2 Anyagtulajdonságok meghatározása

5.2.1 Modellt alkotó komponensek

Az árkádsor viselkedésének modellezésére a szerkezet végeelem modelljének elkészítését láttuk célravezetőnek. Ezzel az eljárással többféle anyagmodellel és anyagparaméterrel vizsgálhatjuk a bonyolult térbeli szerkezet viselkedését. A fejezet a modellben található anyagok tulajdonságainak meghatározását írja le. Az anyagtulajdonságok bemutatásakor különös figyelmet fordítottunk az anyagok időben lezajló tulajdonságváltozásaira (kúszás, viszkózus viselkedés), illetve a talajvíz hatására a vályogszerkezetre.

A modell öt komponensből épül fel. A komponensek egymáshoz kontakt felületek mentén kapcsolódnak. A komponensek úgy lettek megválasztva, hogy:

- egy komponensen belül az anyagtulajdonságok változatlanok legyenek,
- a komponensek csatlakozási felületein változás legyen az anyagtulajdonságokban vagy alakváltozási viselkedésben (pl: két különböző anyag csatlakozása, vagy két ugyanolyan anyag csatlakozása, de a kapcsolatból hiányzik egy merevségi tényező).

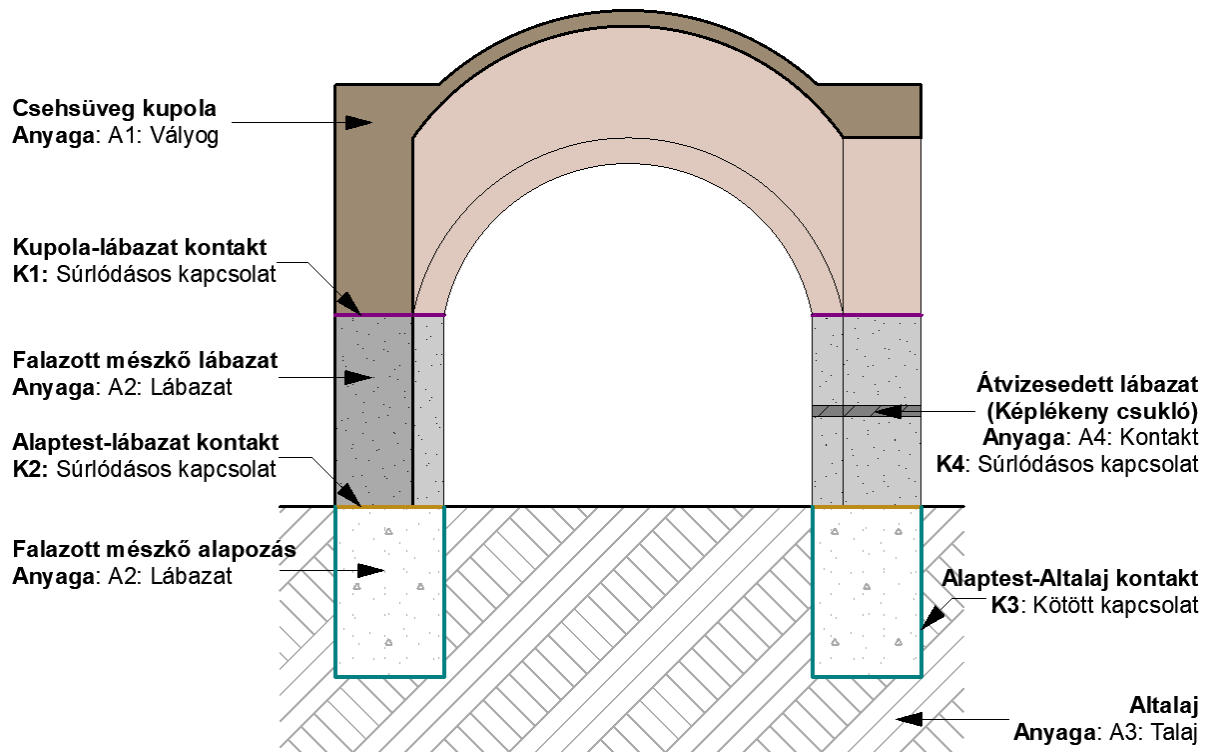
A kontakt felületek lehetnek kötöttek vagy súrlódásosak. Kötött kapcsolat esetén a két komponens húzásra, nyomásra és nyírásra össze van kötve és nem válhatnak el egymástól. Súrlódásos kapcsolatnál a két komponens húzás esetén szabadon elválhat egymástól, a nyírási



28. ábra: Képlékeny csukló a pillér középmagasságában
forrás: saját fotó

ellenállás a kontakt felületet érő nyomóerő függvénye: $F_{\text{súrlódás}} = \mu * F_{\text{Nyomó}}$. Ahol μ a tapadási súrlódási tényező, értéke 0 és 1 között mozoghat ($\mu = 0$ súrlódásmentes kapcsolat, $\mu = 1$ a tapadási súrlódási ellenállás megegyezik a nyomóerővel).

A helyszíni bejáráson arra lettünk figyelmesek, hogy a lábzatok kidőlése nem a talajszint körüli, hanem körülbelül a lábzat félmagasságában van az elfordulási középpont. Ez feltételezéseink szerint a kapilláris vízfelszívás hatására átnedvesedett vályoghabarcs alakváltozásának a következménye. Ennek a feltételezésnek az alátámasztását a következő fejezetekben részletezzük. Az így kialakult képlékeny csuklót egy 6 cm vastag, nagyon puha kontakt elemmel modelleztük. A kontakt elem az átvizesedett vályoghabarcs rétegek viselkedését modellezi, így anyagi viselkedésében átázott vályogként kezeltük.



29. ábra: Az árkádsor modelljének komponensei

| Megnevezés | Viselkedés | | | Anyagmodell |
|-------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| | Rugalmas szakasz | Képlékeny szakasz | Időfüggő alakváltozás | |
| A1: Vályog | X | - | X | Viszkoelasztikus |
| A2: Lábazat | X | - | - | Rugalmas |
| A3: Talaj | X | - | - | Rugalmas |
| A4: Kontakt | X | X | X | Viszkoplasztikus |

6. táblázat: Modell komponensek viselkedése
(A „-” jel arra utal, hogy a vizsgált modell esetében a hatás nem domináns)
forrás: saját adatbázis

Az **III. mellékletben** összeszedtük a leggyakrabban használt rugalmas, képlékeny, viszkoelasztikus és viszkoplasztikus anyagtörvényeket. Ezeket összehasonlítva, a megoldandó feladatunk szempontjából értékelve választottuk ki, hogy melyiket használjuk az árkádsor modellezésére.

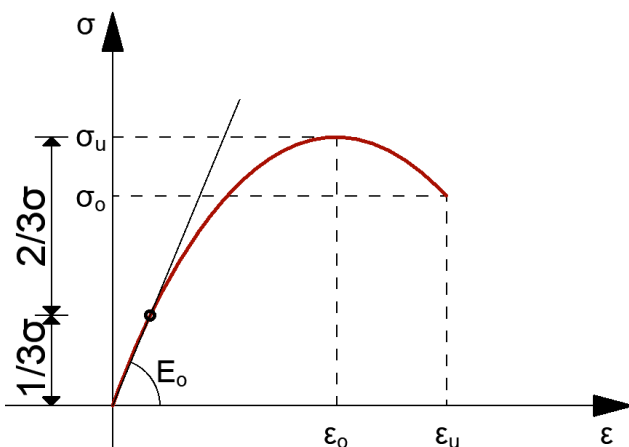
5.2.2 Vályogfalazat



30. ábra: Khan beszakadt szélső kupolája,
forrás: saját fotó



31. ábra: Vályogtégla minta, forrás: saját fotó



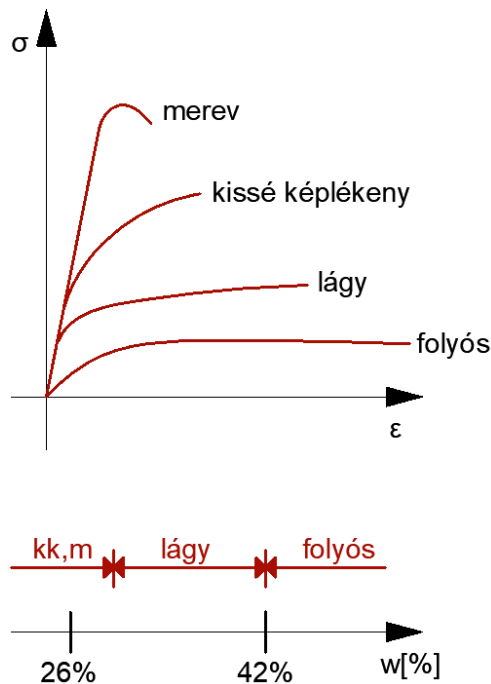
32. ábra: Vályogfalazat sematikus $\sigma - \epsilon$
diagrammja, forrás: [14]

Modellünkben két komponens épül fel vályog anyagból: a boltozat és a kontakt elem. A boltozat nedvességtartalma alacsony, így a merevsége nagy. A kontakt elem anyagának magas a nedvességtartalma, így lágy viselkedés feltételezhető. A boltozathoz szedett vályogtégla mintából megállapítottuk a vályog szemeloszlását, frakcióit. Vizsgálataink szerint a téglák összetétele nagyrészt iszap és homok (agyag: 5 tömeg%, iszap: 29 tömeg%, homok: 52 tömeg%). Fathy az építéshez használt vályogtégákat a helyszínen talált talajból készítette, amely a Nílus közelsége miatt jellemzően iszapos homok [39], ami a vályogtégla mintából kapott eredményekkel egyezik. 2,5 m³ vályogtégla kialakításához 1 m³ homokot és 2 m³ vályogföldet használtak fel, míg a habarcsban 1 m³ homokhoz 3 m³ vályogföldet adagoltak [10].

A talajok teherbírasi vizsgálatával ellentétben, ahol az anyag a Mohr-féle törési feltétel szerint viselkedik, a vályog rugalmas-viszkózus anyagként viselkedik. A lineáris rugalmasság feltételezése csak kis feszültségek esetén fogadható el [19]. Általánosan a falazatok és így a vályogfalazatok alakváltozásai egy nem lineáris görbét követnek [14]. Egy bizonyos feszültség eléréséig (σ_0) az anyag stabilisan

viselkedik, azaz az alakváltozások növekedésével a feszültségek is növekednek. Ennek a maximális feszültségnek az elérése után (indifferens pont) instabil állapotba kerül, azaz az alakváltozás növekedésével a feszültségek csökkennek. A vályogfalazatok ilyen

viselkedésének a modellezése nagyon nehéz, mert az instabil rész bevezetésével a végeselem módszer által használt potenciális energia minimumtétele nem használható, mert így a potenciális energiának nemcsak minimuma, hanem maximuma, illetve inflexiója is lehet [40]. A fellágyuló anyagmodellek továbbá nagyon érzékenyek a végeselemháló beállításaira, így eltérő hálósztásokkal teljesen más eredményeket lehet kapni. Ezen indokok miatt a fellágyuló anyagmodell használata helyett egy lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny anyagmodell használata mellett döntöttünk, amit gyakran használnak a falazatok modellezésére [14].

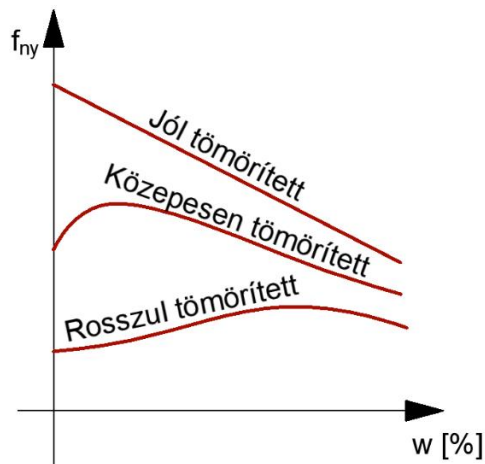


33. ábra: Vályog viselkedése a konzisztenciaállapot függvényében, forrás: [19]

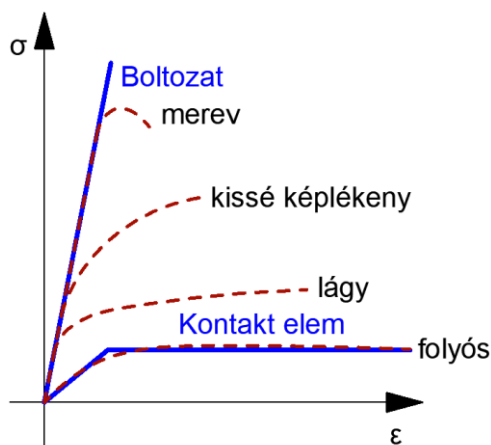
A vályog víz hatására megváltoztatja a mechanikai tulajdonságait. A víz hatására megduzzad és szilárd/rideg viselkedés helyett plasztikusan kezd viselkedni. A duzzadás mértéke függ a frakciók arányától és a finomfrakciók kristályaitól (a montmorillonit jobban duzzad, mint a kaolinit) [2]. Esetünkben nagyobb mennyiségű montmorillonit van, mint kaolinit [34] [35]. A vízmennyiség növekedésével az anyag veszít a szilárdságából és nő a duktilitása. Az anyag száradásakor kialakuló repedéskép függ a vályog összetételétől. Esetünkben a homokos-iszapos vályog kiszáradásakor sok kis repedés alakul ki. Ezek a repedések az anyag duzzadásakor be tudnak zárulni, de a kapcsolat szilárdsága sosem lesz az eredetivel egyenértékű [19]. A vályog konszolidációját/viszkózus tulajdonságait a talajokhoz hasonlóan a

vízáteresztő képesség határozza meg, amely a finomfrakciók arányától függ.

Az árkádsor esetében a mészkőből falazott és vályoghabarcsba rakott lábázat sok nedvességet szívhatott fel az 1947-es árvízkor, majd a meleg, száraz éghajlaton kiszáradhatott és berepedezett. A talajvízszint magasságának folyamatos növekedése miatt a lábázat vizesedni kezdett, amely pórusvíz bejutott a repedések közé és tovább csökkentette a repedezett habarcs szilárdságát.



34. ábra: Vályog nyomószilárdsága a tömörítés és a víztartalom függvényében, forrás: [19]



35. ábra: A vályog anyagú modell komponensek viselkedésének változása a konzisztencia függvényében

Luxor területén a relatív nedvességtartalom 25-55% között ingadozik, amely az árkádsornál használt szalmával erősített, homokos-iszapos vályogban 1,2-2% egyensúlyi nedvességtartalmat eredményez [2]. Ilyen nedvességtartalom mellett a vályog mereven viselkedik. A kapilláris vízfelszívás hatására át tud nedvesedni a vályog, amely nagyban növeli a duktilitását és csökkenti a szilárdságát.

A vályogboltozat viselkedését egy lineárisan rugalmas anyagtörvény írja le legjobban (figyelni kell, hogy a feszültség ne hogy átlépje az anyag törőszilárdságát), a kontakt elem esetében pedig egy lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny anyagmodellt választottunk.

A boltozat anyagmodelljének felállításához meg kell határozni a falazat rugalmas alakváltozási tényezőit (E , G , ν), illetve a törési szilárdságot, nyúlást (f_0 , ϵ_0). A falazat alakváltozási tulajdonságainak meghatározásához először a falazatot alkotó elemek jellemzőit gyűjtöttük össze, majd ezekből egy homogenizációs módszer segítségével kaptuk meg a falazat tulajdonságait [30][46].

A vályog anyagtulajdonságainak meghatározásához nem végeztünk el törési, alakváltozási kísérleteket,

hanem a szakirodalomban javasolt értékekre vettük fel a vályog tulajdonságait.

A falazat szilárdságára, alakváltozási jellemzői sok paramétertől függenek, a szakirodalomban javasolt anyagparaméterek is nagy szórásúak, a javasolt értékek 0,5-6,1 MPa között ingadoznak. A falazat nyomószilárdságát az irodalomban talált adatokból 2,5 MPa-ra vettük. A falazat törési alakváltozását $\epsilon=0,0125^{[14]}$ -ra vettük fel. A vályoghabarcs nyomószilárdságát a téglával egyenlőnek tekintettük [2].

A (vályog)téglák rugalmassági modulusát a törőszilárdság értékének 1/3-hoz húzott vonal iránytangensének felvételével nyerjük az EUROCODE 6 szerint. A rugalmassági modulus értéke a szilárdságénál is nagyobb szórást mutat. A szakirodalomban értéke 100-400 MPa között mozog [14][19][20]. Az árkádsorhoz használt vályogtéglák homokos-iszap összetétele

miatt ridegebben, merevebben viselkednek, mint a nagy agyagtartalmúak, így a rugalmassági modulus értékét 200 MPa-ra választottuk [19].

Általánosságban az mondható el a falazatok alakváltozási jellemzőiről, hogy vízszintes irányban (a falazóelemek hosszanti tengelyével párhuzamosan és a falazatra merőlegesen) merevebben viselkednek, mint függőlegesen, mivel abban az irányban több a merev tégla és kevesebb a puhább habarcs. A vályogfalazatok esetében a vályoghabarcs és a vályogtégla merevségi jellemzői olyan közel állnak egymáshoz (egyenlőnek vehető), hogy a falazatból nyert kontinuum izotróp anyagmodellel modellezhető.

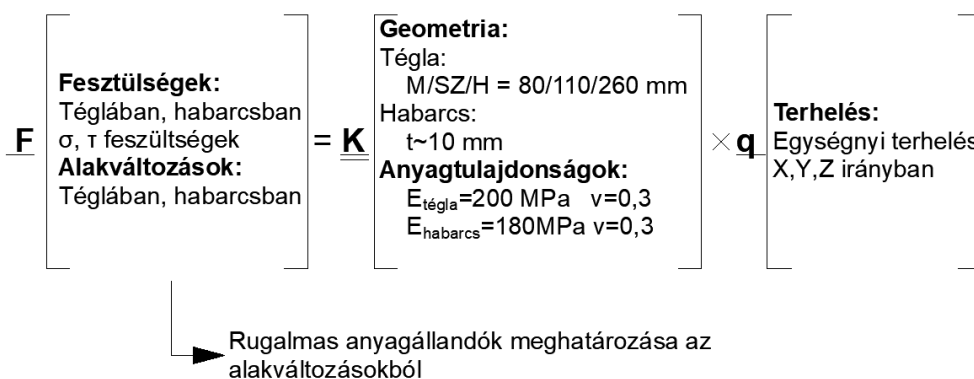
A falazat modellezése diszkrét tégla és habarcs elemekkel bonyolult feladat lenne. Magas numerikus számítási idővel, sok modellezési nehézséggel járna és nem pontos kontakt beállítások, anyagmodell esetén nagy eltéréseket mutat a valóságtól [31][46][47].

Emiatt a falazatot homogén kontinuumként modelleztük, amely hasonlóan viselkedik, mint a diszkrét elemekből álló falazat [30].

A homogenizációs számítás sematikus menete a következő mátrix egyenlettel történik:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} * \mathbf{q}$$

Ahol \mathbf{F} a feszültségeket és alakváltozásokat tartalmazó vektor, \mathbf{K} a merevségi mátrix, amely függ a falazat kötési tulajdonságaitól, a téglák és habarcsrétegek geometriájától és anyagi tulajdonságaiktól és \mathbf{q} a tehervektor. A modellben a kapcsolatok tökéletesen merevek, az anyagok lineárisan rugalmasak. Az \mathbf{F} vektor ismeretében egyszerűen kiszámíthatók a falazattal egyenértékű homogén kontinuum anyagállandói.



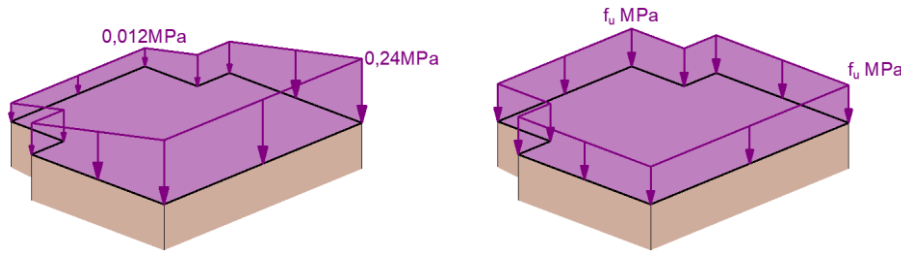
36. ábra: Homogenizáció sematikus menete, forrás:[30]

A homogenizációs algoritmus elvégzése után a falazat anyagállandói a következők:

$$E = 196\text{MPa} \quad \nu = 0,3 \quad G = 75,5 \text{MPa} \quad (\text{izotróp anyagnál } G = 75,3\text{MPa lenne})$$

Így a vályogboltozat homogén izotróp, lineárisan rugalmas anyagként modellezhető.

A kontakt elem anyagtörvényének felírásához először meg kell határozni a folyáshatárát. Ezt úgy állapítjuk meg, hogy meghatározzuk azt a legnagyobb feszültséget, melynél a lábazat középmagasságában ki tud alakulni képlékeny csukló.



37. ábra: bal: Függőleges feszültségek a lábazat magasságának közepén, jobb: Helyettesítő „képlékeny csukló”

Ha az árkádsort a képlékeny csukló megléte nélkül modellezzük, akkor a lábazat magasságának közepén kialakul egy feszültségrendszer. Ebből vissza lehet számolni a függőleges eredő erőre ($A_{pillér}=66\ 5500\text{ mm}^2$):

$$F_v = 0,012 * 66\ 5500 + \frac{(0,24 - 0,012) * 66\ 5500}{2} = 83,85\text{ kN}$$

A képlékeny csukló kialakulásának feltétele, hogy egy keresztmetszet minden pontja elérje a képlékeny határt, így ennek a feszültségmezője konstans.

$$F_v = f_u * 665500 = 83,85\text{ kN} \rightarrow f_u = 0,126\text{ MPa}$$

Az előzőekben a száraz állapotban lévő vályog szilárdságára egy 2,2-2,6 MPa körüli értéket vettünk fel valósnak, így képlékeny csukló csak akkor alakulhatott ki, ha a habarcs szilárdsága nagymértékben lecsökken és ez nagy valószínűséggel a pórsvíznek köszönhető.

A kontakt elem viselkedését leíró anyagtvörvény most már felírható. Először felírtuk a felpuhuló anyagtvörvényből nyerhető σ - ϵ diagrammot, majd ezt egy ezzel egyenértékű rugalmas-képlékeny anyagmodellel helyettesítettük.

A puhuló anyagmodell által disszipált alakváltozási energia törési határállapotban:

$$E_p = \frac{\sigma_o * \epsilon_o}{2} + \sigma_u * (\epsilon_u - \epsilon_o) + \frac{(\epsilon_u - \epsilon_o)(\sigma_o - \sigma_u)}{2} \rightarrow E_p = \frac{\sigma_u * \epsilon_u + \epsilon_u * \sigma_o - \sigma_u * \epsilon_o}{2}$$

A képlékeny anyagmodell által disszipált alakváltozási energia törési határállapotban:

$$E_k = \frac{\sigma_o^* * \epsilon_o^*}{2} + (\epsilon_u - \epsilon_o^*) * \sigma_o^*$$

Figyelembe véve, hogy mindkét anyagmodellnek ugyanakkora a kezdeti rugalmassági modulusa $\rightarrow \sigma_o^* = E_o * \epsilon_o^*$

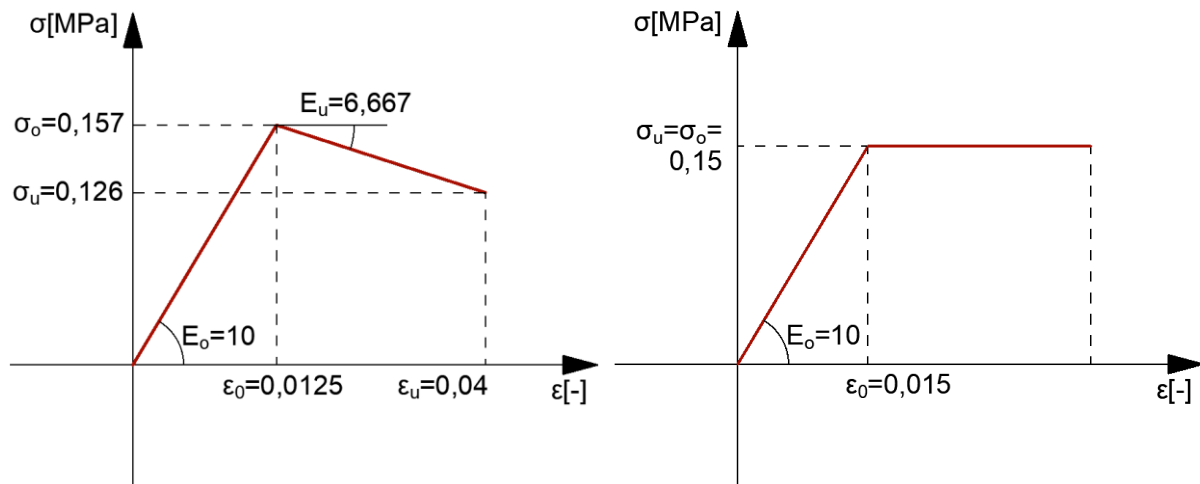
$$E_k = E_o * \epsilon_o^* \left(\epsilon_u - \frac{\epsilon_o^*}{2} \right)$$

A két anyagmodell felcserélhetőségének a feltétele, hogy az általuk disszipált alakváltozási energia megegyezik, innen számítható a képlékeny rendszerhez tartozó folyáshatár és a hozzá tartozó alakváltozás: $E_k = E_p$

A rugalmassági modulus értéke a merev vályog rugalmassági modulusának 1/20-ára vehető fel $E_0 = 10 \text{ MPa}$ [28].

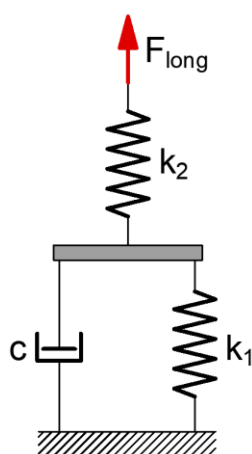
$$\sigma_u = 0,126 \text{ MPa}, \sigma_o = 0,1575 \text{ MPa} \quad \epsilon_o = 0,0125 \quad \epsilon_u = 0,04$$

$$\rightarrow \epsilon_o^* = 0,015, \sigma_o^* = 10 * 0,015 = 0,15 \text{ MPa}$$



38. ábra: Idealizált $\sigma - \epsilon$ diagrammok: bal: Puhuló, forrás: [14],
jobb: Tökéletesen képlékeny

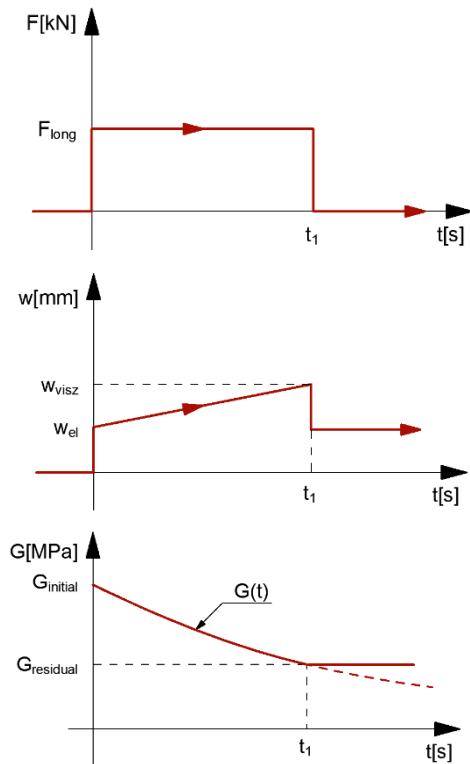
A végeelem modellben használt anyagmodell annyiban tér el a felvázolt képlékeny anyagmodelltől, hogy a képlékeny szakasz nem szakad meg a szakadási nyúlásnál, illetve a modell konvergálása érdekében a képlékeny szakasz kismértékben felkeményedő ($E_t = 0,05 \text{ MPa}$ tangens modulusú).



39. ábra:
Kelvin+Hooke elem
forrás:[41]

A vályogból készült szerkezetek konstans terhelés hatására viszkózusan alakváltoznak. A vályogboltozat viszkózus alakváltozásait az eddig meghatározott rugalmas anyagmodelljéből adódóan viszkoelasztikus anyagmodellel lehet modellezni. A szerkezet viszkoelasztikus alakváltozását/ reológiai viselkedését egy Kelvin-Voigt és egy Hooke elem soros kapcsolásával lehet modellezni. A Kelvin elemhez kapcsolt Hooke elem pillanatszerűen tud reagálni az igénybevételekre, így ez az anyagmodell rugalmas része, mely a k_2 rugómerevséggel modellezhető ($E = 200 \text{ MPa}$). A Kelvin elem az anyagmodell viszkózus része, benne két paraméter a k_2 rugóállandó és a c viszkozitási együttható [41]. A rendszer

alakváltozását kezdetben a k_1 rugómerevség szabja meg, majd az idő múlásával a k_2 és a c hatása is domináns lesz. Az alakváltozás növekedést az anyag nyírási rugalmassági modulusának időben történő csökkenése okozza, amelynek matematikai összefüggéseit a Prony



40. ábra:
Felül: Konstans terhelés hatására kialakuló
középen: viszkózus alakváltozás és
alul: merevségcsökkenés

sorozat írja le, mely n db Kelvin elem párhuzamos sorolásából és ehhez sorosan kapcsolt Hooke elemből tevődik össze. [42].

$$G(t) = G_{initial} * \left(\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i * e^{t * \phi_i} \right) \text{ ahol } \phi_i = -\frac{1}{t_i}$$

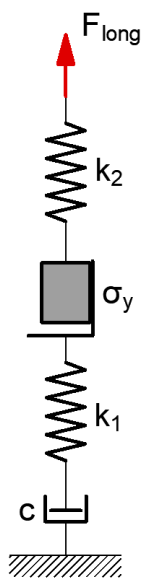
A $G(t)$ függvény a nyírási rugalmassági modulus értékét határozza meg minden időpillanatban. $G_{initial}$ a kezdeti nyírási rugalmassági modulusot jelöli. Az α tényezők relatív merevséghányadokat jelölnek: α_0 a megmaradó merevséget, α_i az elveszett merevséget, t_i a relaxációs időket jelöli. A mi vizsgálódásaink szempontjából a relaxációs függvény alakja tetszőleges lehet, így elég egy tagot alkalmazni, illetve az α_0 tényező zérusnak vehető, mivel a relaxációs folyamat még mindig tart az árkádsor esetében, így a maradó merevséget nem tudnánk megbecsülni.

$$G(t) = G_{initial} * \alpha_1 * e^{-\frac{t}{t_1}}$$

Az izotróp anyagmodell következménye, hogy a nyírási rugalmassági modulus változásával a Young modulus is változik, hogy tartsa a $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ összefüggést.

$$E(t) = 2(1 + \nu) * G_{initial} * \alpha_1 * e^{-\frac{t}{t_1}}$$

A relaxáció során a Poisson tényező értéke változatlan. A vályogmintán viszkóziméteres vizsgálatokat nem tudtunk végezni, így a pontos viszkózus alakváltozások meghatározása helyett a jellegük modellezésére törekedtünk. Ebből következően t_1 tetszőlegesen (pl: 20 sec, hogy a pillanatszerű 1s-os alakváltozásoknál a viszkózus alakváltozások még ne fejtsek ki hatásukat) megválasztható és a modellezési időt ennek a többszörösére vettük fel.



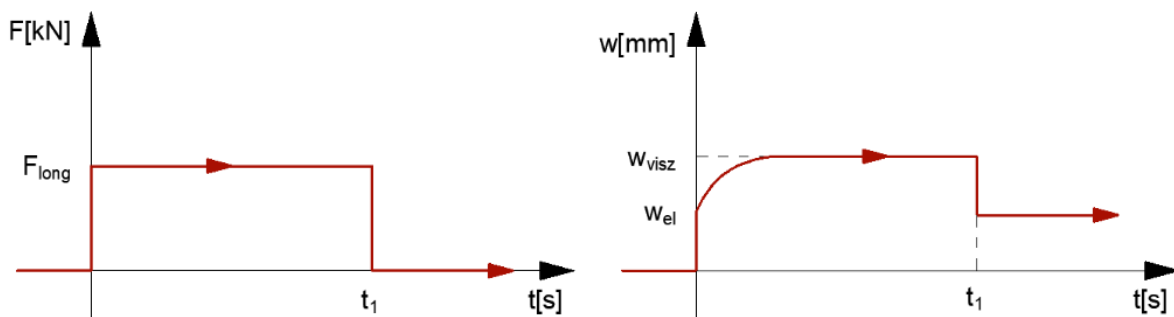
41. ábra:
A használt
viszkoplasztikus
reológiai modell

A kontakt elem időfüggő alakváltozásainak leírásához viszkoplasztikus anyagmodellt kell alkalmazni. Ennek a leírására a Prezyna-féle viszkoplasztikus anyagmodell alkalmazása mellett döntöttünk.

$$\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \dot{\epsilon}_{vp} = \mu * \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} \end{cases}$$

Ahol $\dot{\epsilon}_{vp}$ a viszkoplasztikus alakváltozás sebesség, σ_y a folyási feltétel (előzőekben meghatározott plasztikus anyagmodell), m a deformációsebesség keményedési paramétere (ez a viszkózus alakváltozások csökkenésének gyorsaságát határozza meg), μ pedig az anyag viszkozitási tényezője.

Az anyag a képlékenységi feltétel alatti feszültségeknél tökéletesen rugalmasan viselkedik és nem keletkeznek viszkózus alakváltozások, így a rendszer alakváltozását a k_1 rugómerevség szabja meg (10 MPa). A folyáshatár átlépése után a plasztikus anyagmodell szerinti plasztikus alakváltozások jönnek létre és ehhez viszkózus alakváltozások társulnak, így a rendszer alakváltozásában a k_1 és c tényezők is szerepet játszanak. $m=1$ esetén a viszkózus alakváltozások sebessége lineárisan nő, $0 < m < 1$ értékek mellett az alakváltozások az idő múlásával egy adott értékhez konvergálnak.



42. ábra: Balra: Konstans terhelés hatására kialakuló
Jobbra: viszkózus alakváltozás

A viszkoelasztikus modell alakváltozás-növekménye az eltelt idő (t) és viszkózitási paraméterek (μ , t_k) függvénye, azaz egy feszültségfüggetlen, az időben csökkenő hatású kúszást fejez ki:

$$\dot{\epsilon}_l(t) = \frac{\sigma_0}{\mu_l} - \frac{1 - e^{-\frac{t}{t_k}}}{\mu_l}$$

A viszkoelasztikus kúszást az építés alatt a vályoghoz kevert víz okozza, a vályog kiszáradásával a kúszás hatása fokozatosan csökken, míg végül megáll.

A viszkoplasztikus modell a plasztikus kihasználtság $\left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_y}\right)$ és viszkózitási paraméterek (m , μ) függvénye, azaz a plasztikus feszültségek leépülését, relaxációját írja le és az ehhez tartozó alakváltozásokat:

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \mu_{vp} * \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_y} - 1\right)^{\frac{1}{m}}$$

A viszkoplasztikus relaxációt a lábazatban felszívódott talajvíz idézi elő a vályogban. Mivel a talajvíz folyamatosan jelen van így az anyag nem tud kiszáradni és így a kúszás hatása nem csökken. Míg a viszkoelasztikus kúszás a szerkezet építésétől kezdve fejti ki hatását, lassan deformálva ezzel a boltozati részt, addig a viszkoplasztikus feszültségrelaxáció csak a feszültségek leépüléséig tart.

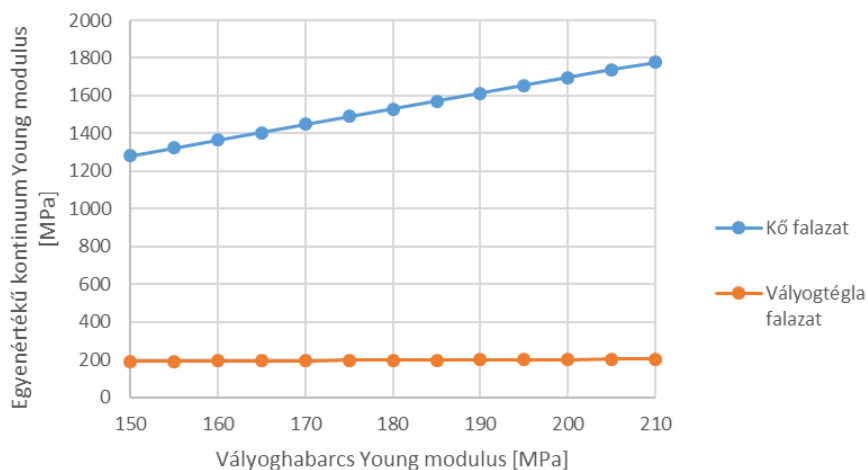
5.2.3. Kőfalazat



43. ábra: Mészkö lábázat
vályoghabarccsal falazva
forrás: saját fotó

Az árkádsor lábázatát (és feltehetően az alapozását is) egy közeli mészkőbányából származó tömör, kis porozitású mészkőből alakították ki, melyet vályoghabarccsal falaztak össze. A mészkőbánya New Gournához közel, a Királyok völgyétől északra helyezkedett el [10]. A mészkő falazó elemek méretei (szélesség x hosszúság x magasság): 22x55x22 cm. A kövek között 2 cm habarcsréteg van.

A kőfalazat homogenizációs módszerrel való modellezése sokkal több problémát vet fel, mint a vályogfalazat esetében, mivel a mészkő és a vályoghabarcs merevsége között nagy különbség van. Emiatt a vályoghabarcs merevségének kis változtatásával nagyon eltérő merevségeket kapunk az egyenértékű kontinuumhoz.



44. ábra: Az egyenértékű kontinuum merevségének változása a falazóelem/habarcs arányának függvényében

A falazat tulajdonságainak meghatározásakor főleg a szakirodalomban talált példákra támaszkodtunk. Modellünkben a lábázat nincs a törési határállapot közelében, így lineárisan rugalmas anyagmodellel közelíthető a viselkedése. A modell szempontjából a falazat pontos alakváltozási tényezőinek nincs nagy szerepe, csak az a fontos, hogy a sokkal puhább vályog falazatnál sokkal keményebb legyen. A kőfalazatokon végzett törésvizsgálatok azt mutatták, hogy a rugalmassági modulusra nagyon nagy szórás lehet kapni – sokkal kevésbé, mint a

szilárdságra [31][32]. A falazat merevségi jellemzőinek leírására ortotróp anyagmodellt javasolnak a következő szerkezettel [31]:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

Ahol E_1 a függőleges, E_2 vízszintes irányokhoz tartozó rugalmassági modulus, ν_{12} a horizontális, ν_{21} a vertikális irányokhoz tartozó Poisson tényező és G_{12} a nyírási rugalmassági modulus. A falazat tulajdonságainak ily módon való felírása tökéletesen merev kapcsolatokat és az elemek rugalmas viselkedését feltételezi, amely csak kis terheléseknél igaz [32]. Kő falazatokra a G/E tényezőre az EC6 által javasolt 0,4 érték helyett $1/3$ használata javasolt [31].

$$E_1 = 1700 \text{ MPa} \quad \nu_{12} = 0,15$$

A vízszintes rugalmassági modulus értéke kicsivel nagyobb, mint a függőlegesé, mert ebben az irányban több a merevebb mészkő, mint a puhább vályoghabarcs.

$$E_2 = 1700 * 1,3 = 2210 \text{ MPa}$$

A merevségi mátrix szimmetriájából következően:

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} * E_1}{E_2} = \frac{0,15 * 1700}{2210} = 0,1153$$

$$G_{12} = \frac{E_1}{3} = \frac{1700}{3} = 566 \text{ MPa}$$

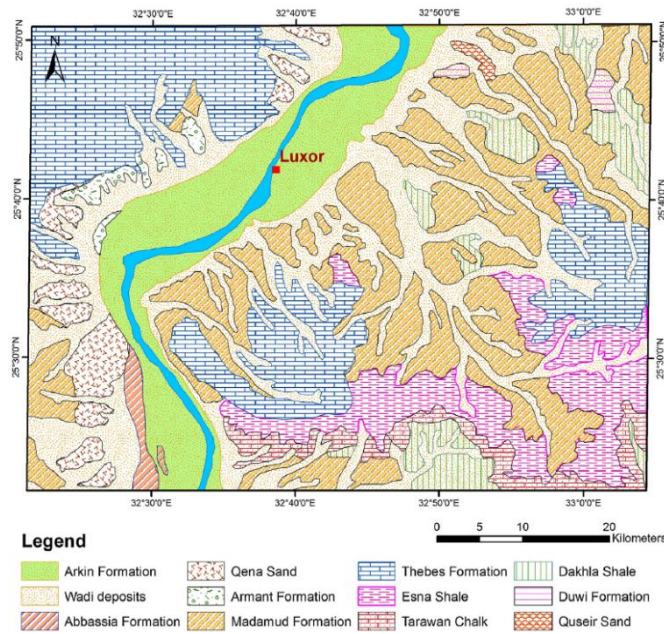
Így a lábazat lineárisan rugalmas ortotróp merevségi mátrixa a következő:

$$K[\text{MPa}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{1700} & -\frac{1}{14733,33} & 0 \\ -\frac{1}{14733,33} & \frac{1}{2210} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{566} \end{bmatrix}$$

Az átvizesedett lábazatrész viselkedését nem lehet modellezni a teljes kontinuum puhításával. Helyette az átvizesedett fűgákkal egyenértékűen viselkedő kontakt elemet helyezünk el a lábazat félmagasságában.

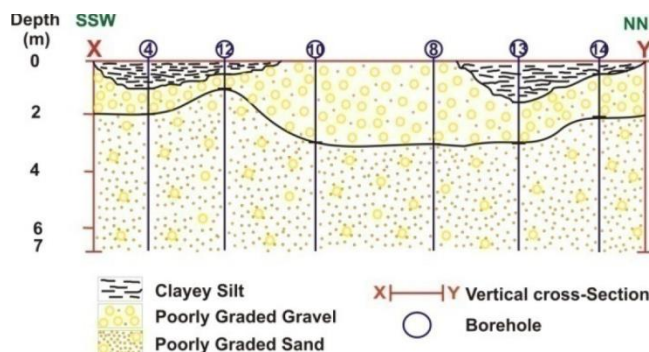
5.2.4. Talaj

Az árkásor talajjal való interakcióinak meghatározásához meg kellett állapítani a talaj mechanikai tulajdonságait. A város épületeihez használt vályogtégglákhoz szükséges anyagot a területen ásták ki, így a vályogtégla-minták szemeloszlási vizsgálataiból sejthető, hogy a talaj homokos-iszap.



45. ábra: Luxor környezetének geológiai térképe,
forrás: [36]

terjednek [33]. Pontosabb talajrétegződés meghatározásához geotechnikai szakvéleményekből kapott adatokat használtunk. A szakvélemények a Nílus másik partján Luxor északi felén, New Tibában készültek [34][35], amely még mindig a mészkővel határolt völgyben található, így feltehetően a talajrétegződés is hasonlít a New Gournaihoz.



46. ábra: Talajszelvény New Tiba-ban
forrás: [34]

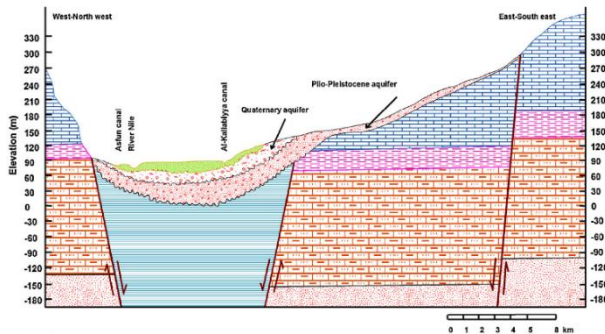
A Nílus völgyét Luxor magasságában egy 20 km szélességben Eocén mészkő réteg szegélyezi, mely hegygerinceket alakít ki a völgy két oldalán. Más folyókhoz hasonlóan a Nílus is labirintusszerűen tekereg, ezek a kanyarulatok a folyásiránnyal párhuzamosan mozognak, mivel a folyó konkáv partjairól elhordja, a konvex partjaira lerakja az üledéket. A folyó főleg agyag és iszap szemcséket szállít. A mészkő völgyfalak között a Nílus által idehordott üledékrétegek találhatóak, ezek kora a Pliocén kortól napjainkig

Vizsgálataik során rosszul osztályozódott homok (PGS) és rosszul osztályozódott kavics rétegeket (PGG) találtak. A felszínhez közel iszapos-homok lencsék helyezkednek el. New Tiba nem fekszik olyan közel a Nílushoz, mint New Gournai, így vélhetően ott több és vastagabb rétegű iszapos-homok réteg található.

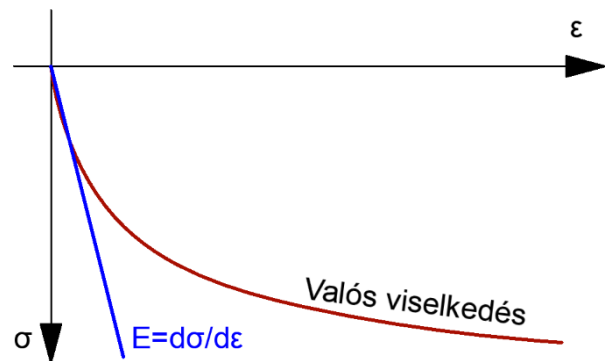
Az homokos-iszaprétegre a következő tulajdonságokat határoztak meg.

| | Connector road ^[34] | Cemeteries ^[35] | Általánosan |
|------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Duzzadás | 30-80% | 60-80% | Alacsony fokozatú |
| Agyagtartalom | 15-17% | 9-12% | Iszapos-agyag |
| Plasztikus index | 17-24% | 15-28% | Alacsony, közepes plaszticitás |

6. táblázat: Talaj anyagjellemzők geotechnikai szakvélemények alapján



47. ábra: Egyszerűsített talajrétegződés Luxorról
forrás: [36]



48. ábra: Talajok valós és közelítő viselkedése

egyeznek meg. Ez a közelítés azért tehető meg, mert a kis terhelések mellett a talaj még kompressziós feszültségállapotban van, azaz nincsenek oldalkitérések, így a nemlineáris viselkedés még nem kezdődik meg [44]. A talaj alakváltozási tulajdonságai annak függvényében változnak, hogy mekkora földtömeg helyezkedik el fölöttük, ez abból következik, hogy a talajszemcsék közötti súrlódás által kialakult ellenállás a nyírófeszültség függvénye $\tau = \sigma * \cos(\phi) + c$. A merevségek változtatása helyett modellünkben meghatároztuk azt a talajmélységet (ún. határmélység), melyben a feszültségek a talpfeszültség 1%-ra csökkentek. Feltesszük, hogy e mélység alatt a talaj elvágható és egy végtelenül merev támasszal helyettesíthető [43]. A határmélység meghatározásához a Jáky-féle határmélység

A Nílus által lerakott üledékréteg vastagsága a partokon 7-10 méterig terjedhet. Ezek összetétele általában iszapos-homok. A talajvíz Luxor közelében mért pH értéke 8-8,8 körüli, amely közel áll a sósvíz pH értékéhez [39]. A keleti parton található ókori egyiptomi templomokon észlelt sókárok is a talajvíz magas sótartalmára engednek következtetni [36]. A talajok viselkedése mechanikai hatásokra nem lineáris görbe szerint történik. Az alakváltozások hatására mobilizálódnak a nyírófeszültségek és így exponenciálisan csökken a merevség. Esetünkben a talajra ható erőhatások olyan alacsonyak, hogy a talaj viselkedése egy lineárisan rugalmas izotróp anyagmodellel jellemezhető, amelynek rugalmassági tulajdonságai a kezdeti szakaszt leíró húrmodulussal $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$

elméletet használtuk, amely szerint, ha egy $B \times L$ befoglaló méretű felülettel terheljük a talajt, akkor a határmélység a következő képlettel számítható:

$$m_0 = 2B * \left(1 - \frac{B}{2L}\right) = 2 * 0,8 \text{ m} * \left(1 - \frac{0,8 \text{ m}}{2 * 1 \text{ m}}\right) \approx 1 \text{ m}$$

Mivel a határmélység bevezetésével a talajrétegződés felső két métere van csak benne a modellben, a meghatározó talajkomponens a Nílus által lerakott üledékes iszapos-agyag réteg.

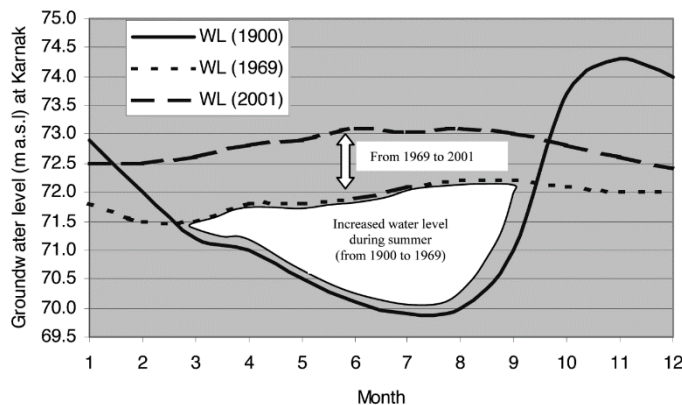
| Megnevezés | | Konzisztencia | | | | Leírás |
|------------|---|---------------|--------|-------|--------|---|
| | | Puha | Médium | Merev | Kemény | |
| ML | E | 2,5-8 | 10-15 | 15-40 | 40-80 | alacsony plaszticitású iszap |
| | v | 0,3-0,35 | | | | |
| ML, CL | E | 1,5-6 | 6-10 | 10-30 | 30-60 | közepes plaszticitású iszap, alacsony plaszticitású agyag |
| | v | 0,2-0,3 | | | | |
| CL | E | 0,5-5 | 5-8 | 8-30 | 30-70 | közepes plaszticitású agyag |
| | v | 0,1-0,5 | | | | |

7. táblázat: Kötött talajok anyagparaméterei a konzisztencia függvényében, forrás: [48][49]

A magas talajvízszintből adódóan az árkádsor alatti talaj valószínűleg puha, esetleg médium konzisztenciájú. Az összetétele a geotechnikai szakvéleményekből következtetve a ML, CL közé esik. Így a talajparaméterek a következő értékekre lettek felvéve:

$$E = 8,5 \text{ MPa}, \quad \nu = 0,3$$

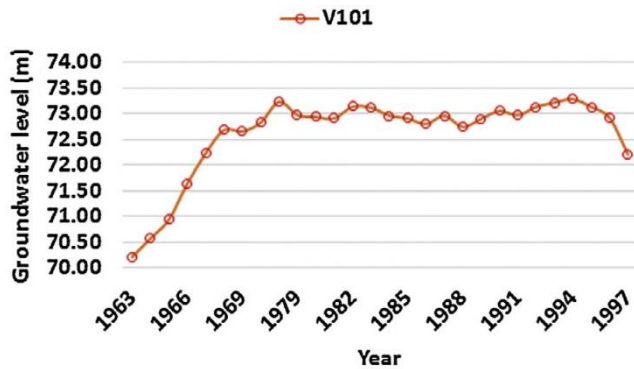
Az árkádsor alatti talaj főleg alacsony plaszticitású iszaptól és agyagtól áll, így a talajkonszolidáció az építést követő maximum fél éven belül lezajlott, így ennek nem lehet hatása a közelmúltban kialakuló folyamatos alakváltozásokra.



49. ábra: Talajvízszint növekedése 1900-tól 2001-ig, forrás:[37]

Az árkádsor anyaga nagyon érzékeny a nedvesedésre, ezért a talajvíz magasságának meghatározása elsőrendű fontosságú. Több szakirodalom is jelezte a magas talajvízszintből eredő épületkárokat [36][37][38]. New Gurna a Földközi tenger szintje fölött 80 méterrel fekszik [45]. Történelmileg a talajvízszint +70 méter körül ingadozott, viszont az

1900-as évek óta a vízszint folyamatosan nő. Ez a megnövekedett öntözésnek [37], illetve az 1970-es években épített Aswan High Dam következménye [36]. A talajvíz magas sótartalma reakcióba léphet az alapozásnak használt mészkövekkel és felbonthatja ezeket. Ilyen hatásokra már felfigyeltek a Nílus keleti partján található ókori templomoknál [36]. A sókristályosodás porózus anyagok tönkremenetelét okozhatja, mivel a pórusokban kristályosodó sók által



50. ábra: Talajvízszint növekedése 1963-tól 1997-ig, forrás: [36]

a lábazati szakaszra is, kitéve a teljes szerkezetet a sókároknak.

A talajvízszint tovább nőtt New Gournában és mostanra már csak 40-50 centivel van a földfelszín alatt. Ez a kiépítetlen szennyvíz-rendszernek és a pazarló öntözési technikáknak köszönhető. Az utcák burkolása és aszfalt utak építése tovább rontott a helyzeten. A talajvíz károsító hatását New Gournai területén már 2011-ben az UNESCO projekt alatt észrevették [38].

„A kísérlet akkoriban egyedi, gyönyörű és kényelmes volt, de mostanra több a negatívum, mint a pozitívum. Az épületek dőlnek össze a megnövekedett talajvízszint miatt, ami a szennyvízelvezetés és a mezőgazdasági öntözési módszerek miatt van. – Abdel Fattah Hassan, New Gournai lakos” [38].

Fathy is felismerte a talajvíz károsító hatását: *„A kapilláris vízfelszívás miatt a falak alsó szakaszai folyamatosan romolnak a nedvesedés-kiszáradás ciklusok folytán. Gyakran alkalmazott technika a falak alsó 15 cm-ét vízálló anyagból készíteni” [10].* Az akkori alacsony talajvízszintek miatt viszont valószínűleg nem készült fel a mostanra beálló helyzetre.

kifejtett nyomás szétfeszíti az anyagot. Az árkádsor építésénél használt mészkő pontos összetételét nem tudjuk, de a teherbíró funkció miatt kevés pórussal rendelkező köveket használtak [10], így a sók erodáló hatása kevésbé hat rájuk. Ettől függetlenül hosszú távon szerkezeti problémákat is okozhat. A vályoghabarcs engedi a só felszívódását

| <i>Komponens</i> | <i>Megnevezés</i> | <i>Viselkedés</i> | <i>Használt elmélet</i> | <i>Paraméterek</i> |
|------------------|--|----------------------------------|---|--|
| Vályog | Száraz, merev, iszapos-homok vályog | Viszkoelasztikus- izotróp | Hooke törvény +Prony sor | $E=200$ MPa $\nu=0,3$ $f_u=2,5$ MPa $\alpha=?$ $t_k=20$ |
| Kontakt | Átnedvesedett, képlékeny, iszapos-homok vályog | Viszkoplasztikus- izotróp | Bilineáris képlékeny +Prezyna modell | $E=10$ MPa $\nu=0,3$ $\sigma_y=0,15$ MPa $m=?$ $\mu=?$ |
| Lábazat | Mészke +vályoghabarcs kitöltés | Lineárisan rugalmas- ortotróp | Hooke törvény | $E_1=1700$ MPa $E_2=2210$ MPa $\nu_{12}=0,15$ $\nu_{21}=0,1153$ $G_{12}=566$ MPa |
| Talaj | Üledékes, iszapos, homokos talaj | Lineárisan rugalmas- izotróp | Hooke törvény | $E=8,5$ MPa $\nu=0,3$ |

8. táblázat: A modellben használt komponensek, anyagok, elméletek és paramétereik,

A modellben található súrlódási tényezők értékeit első iterációként a szakirodalomban ajánlott értékekre vettük fel:

| <i>Egyik anyag:</i> | <i>Egyenetlen, kemény kőzet</i> | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|
| <i>Másik anyag:</i> | Finom homok, sovány iszap | Médium iszap, Médium agyag | Finom, homokos, nem plasztikus iszap | Egyenetlen, kemény kőzet |
| μ súrlódási együttható | 0,45-0,55 | 0,35-0,45 | 0,3 | 0,55 |

9. táblázat: Súrlódási együtthatók különböző anyagok között,
forrás: [50]

| <i>Index</i> | <i>Egyik anyag</i> | <i>Másik anyag</i> | <i>Kapcsolat típusa</i> | <i>Súrlódási tényező</i> |
|--------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| K1 | Vályog | Mészke falazat | Súrlódásos | 0,6 |
| K2 | Mészke falazat | Mészke falazat | Súrlódásos | 0,55 |
| K3 | Mészke falazat | Iszapos talaj | Súrlódásos | 0,35 |
| K4 | Mészke lábazat | Telített vályog | Súrlódásos | 0,3 |

10. táblázat: A modellben használt súrlódási tényezők értékei,

5.3. Modellek felépítése

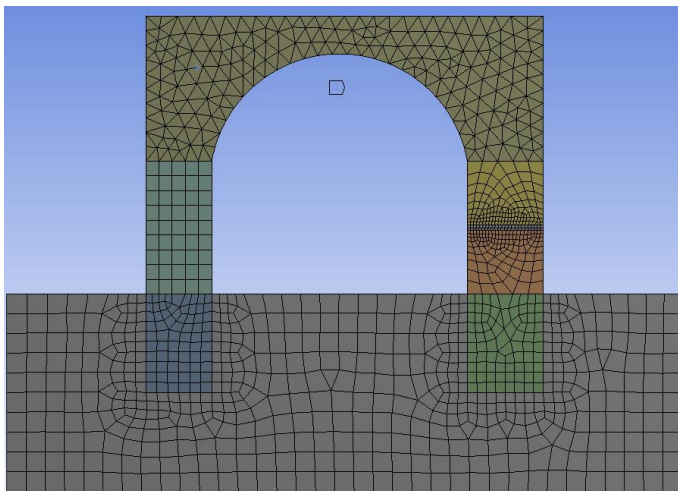
5.3.3. Terhek felvétele

Egyiptom középhőmérséklete nem megy $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá, így a figyelembe vehető hőterhelés elhanyagolhatóan kicsi. Az árkádsor viszonylag sűrűn körbe van építve, így a ráható szélterheléstől is el lehet tekinteni. A modellben figyelembe vett egyetlen terhelés az árkádsor önsúlya:

Mészkö falazat: 2600 kg/m^3 [31]

Vályog falazat: 1700 kg/m^3 [14]

5.3.4. Végeselemháló felvétele



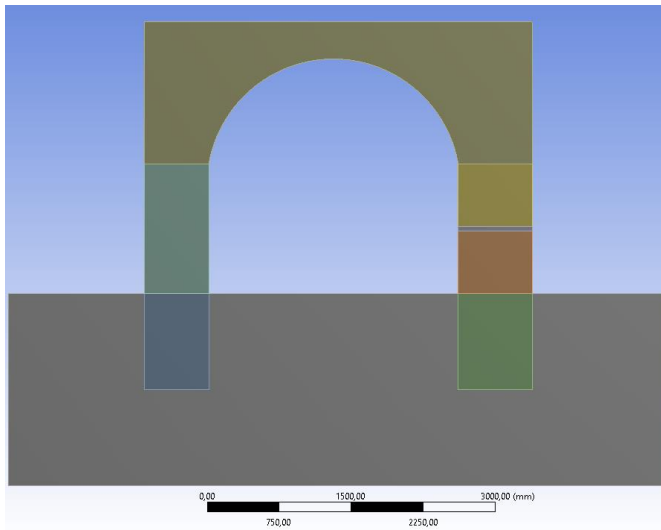
51. ábra: A végeselemmodell első iterációs hálóosztása

A végeselemháló felvételénél a boltozati részhez szimplexekből álló háromszöghálót definiáltunk, mert ez jobban le tudja követni a geometriát. A falak, pillérek, alaptestek és a talaj modellezésére négyszögrácsot alkalmaztunk, mivel ezek az elemek közel merőleges oldalakkal rendelkeznek, ami jól illeszkedik a pillérek geometriájára, így négyszögű hálóból kevesebb elemmel és kevesebb

numerikus hibával lehet számolni. A háló az alaptestek és a kontakt elemek, kapcsolatok körül be van sűrítve, hogy jól tudja modellezni a két anyag interakcióját és a nemlineáris viselkedéseket.

Hogy biztosan hálófüggetlen megoldást kapjunk, a vizsgálatokat többször lefuttattuk, minden iterációban a program sűrítette, pontosította a végeselemhálót. Ezt addig folytattuk, míg két egymást követő számítás között a feszültségek közötti eltérés nem haladta meg az 5%-ot.

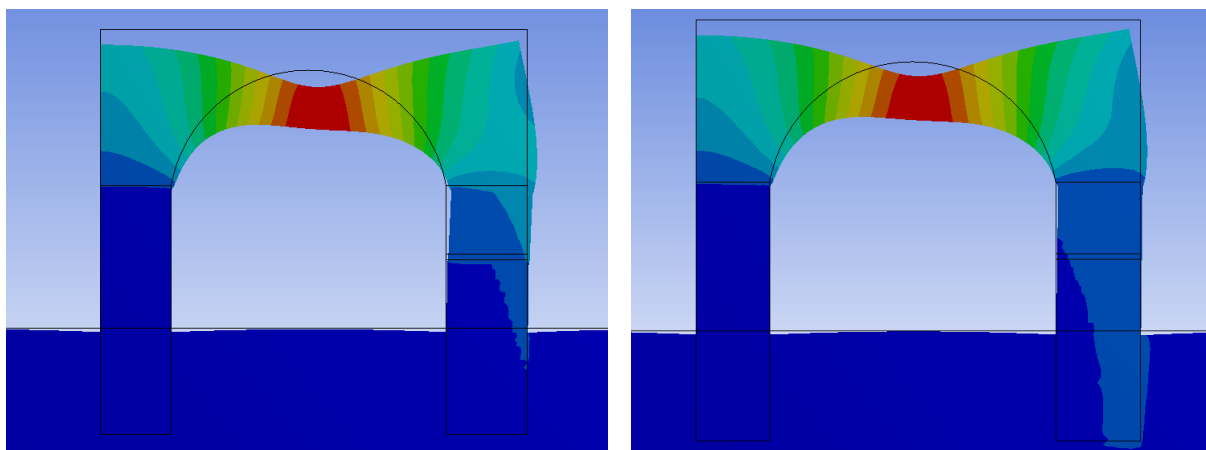
5.3.5. 2D modell



52. ábra: Árkádsor 2D-s végeelem modellje

Elsőnek az alap paraméterek meghatározásához (súrlódási tényezők, viszkózus paraméterek) egy 2D modellt építettünk fel, amely az árkádsor tengelyére merőleges boltív síkjában felvett metszetből áll. A talajt modellező lineárisan rugalmas tárcsa három oldalán az oldalra merőleges, tökéletesen merev támaszok vannak definiálva, a talaj vastagsága a Jáky-féle határmélység elméletből 2 méter (1 méter alaptest +1 méter az elméletből). A talajhoz

kapcsolódnak az 1 méter mély alaptestek, ezek anyaga a lábazat anyagával megegyezik, amely lineárisan rugalmas. A vályogboltozatot viszkoelasztikus anyagmodellel modelleztük. A boltvállak és a lábazat kapcsolata súrlódásos (**K1**), melynek súrlódási paramétere μ_1 . A lábazat és az alaptest között súrlódásos kapcsolat van (**K2**), amelynek súrlódási paramétere μ_2 . Az alaptest-talaj kapcsolata súrlódásosra vettük fel (**K3**), melynek súrlódási tényezője μ_3 . A kontakt elem és a lábazat súrlódásos kapcsolatú (**K4**), amely a μ_4 paraméterrel jellemezhető. A kontakt elemet viszkoplasztikus anyagmodell definiáltuk. Az árkádsor udvar felőli oldalán egy fal fut végig, melyet a síkjára merőlegesen harántfalak merevítettek, ennek a hatását egy végtelenül merev, a fal síkjára merőlegesen működő támasszal modelleztük.



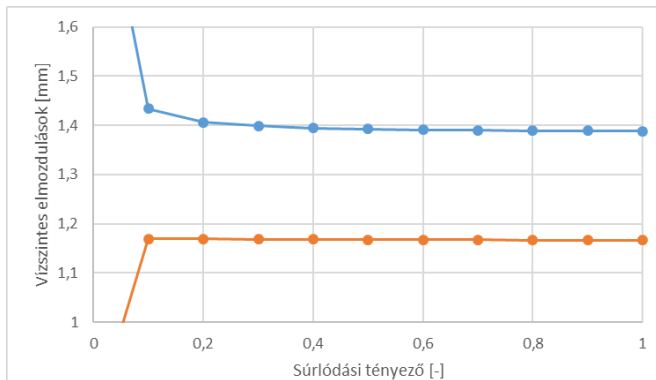
53. ábra: Árkádsor alakváltozási ábrája Bal: Kontakt elemmel, Jobb: Kontakt elem nélkül

Kék: Legkisebb elmozdulás, Piros: Legnagyobb elmozdulás

A többi elmozdulás-ábrán is ezt a jelölést alkalmaztuk.

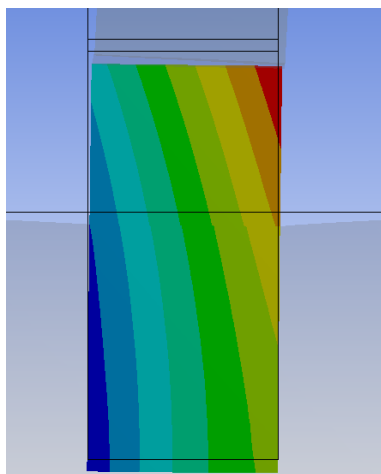
5.3.6. Észrevételek/tapasztalatok a 2D modellkísérletekből:

K2: Lábazat és alaptest kapcsolata



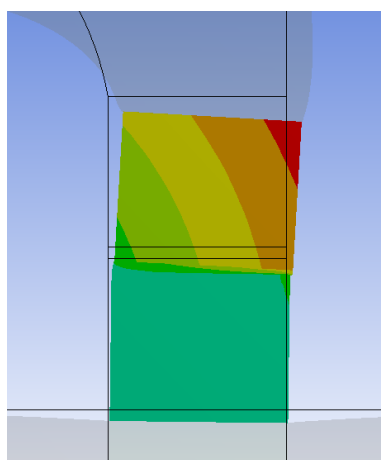
54. ábra: Vízszintes elmozdulások alakulása a súrlódási tényező függvényében

A helyszíni bejárásnál nem tapasztaltunk a lábazat és az alaptest között elcsúszást. A helyszíni méréseink szerint a szélső és belső állásokban a pillér és a fal távolsága a felszín közelében közel egyenlő, így feltehetően az alaptest és a lábazat közötti vízszintes elmozdulások nem nagyok. Számításaink szerint a súrlódási tényező értéke nem változtatja a vízszintes



55. ábra: Alapozás és lábazat elmozdulás-ábrája

elmozdulásokat (kivéve $\mu = 0$ esetében). Továbbá az alaptest és a lábazat között kb. 0,23 mm elmozdulás-különbség keletkezik. A csatlakozó felület minden pontja a terhelési időtartam minden pillanatában nyomott, így a két felület sehol nem akar elválni függőlegesen. Ebből adódóan a kapcsolat kötötté alakítása nincs hatással a boltozat alakváltozásaira és feszültségeire, így a számítási idő csökkentése érdekében kötötten alakítottuk ki.

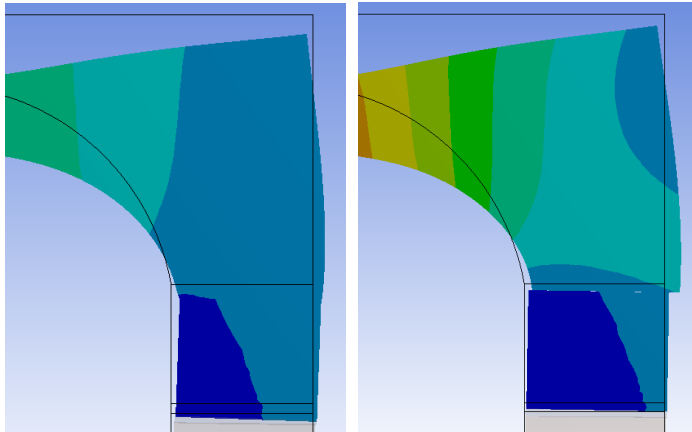


56. ábra: Kontakt elem és lábazat elmozdulás-ábrája

K4: Kontakt elem és a lábazat kapcsolata

A képlékeny csukló magasságában a helyszíni szemlén ugyancsak nem láttunk elcsúszást, csak elfordulást. Ennek a kapcsolatnak a vízszintes elcsúszására sincsen hatással a súrlódási tényező (ameddig $\mu \neq 0$, nem akar elcsúszni), így értéke tetszőleges lehet. Mi az eredetileg meghatározott $\mu = 0,3$ -as súrlódási tényezővel számoltunk a továbbiakban. Ez a kapcsolat nem modellezhető kötötten, mivel a 3D-s modellben számíthatunk a csatlakozási felületek elválására.

K1: Boltváll és lábázat kapcsolata



57. ábra: Lábázat és boltozat elmozdulás-ábrája
Balra: $\mu=1$, Jobbra: $\mu=0,3$

A vályog boltozat és a mészkő lábázat kapcsolatánál a helyszíni bejáráson nem láttunk elcsúszásokat, így valószínűsíthetően a vályoghabarcs, mely mindkét falazott komponensben van, összetartja a kapcsolatot. Ha a két csatlakozó felület el tudna csúszni egymáson, akkor a boltozat nem nyomná kifelé a lábazatot, hanem egyszerűen elcsúszna a boltváll

magasságában. A kapcsolatot $\mu = 1,0$ -es súrlódási tényezővel alakítottuk ki. A kapcsolatot azért modelleztük súrlódásosan, mert számítottunk a két elem elválására a deformációk növekedésével a 3D modellben.

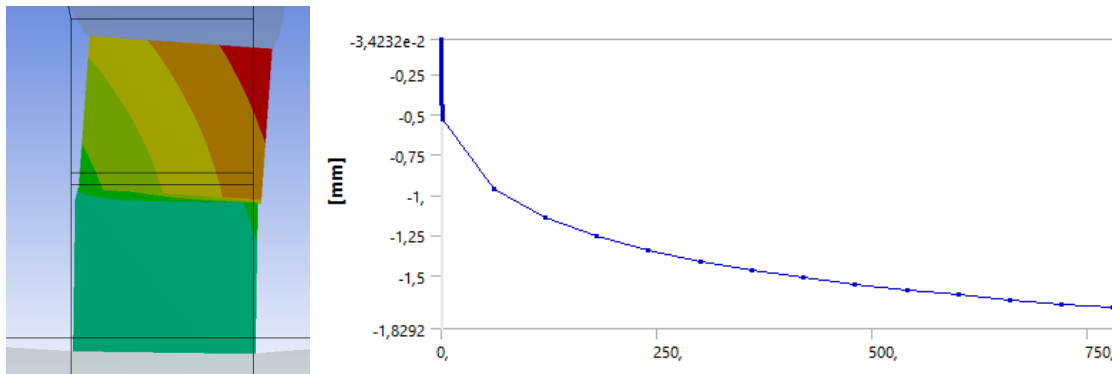
K3: Talajparaméterek felvétele



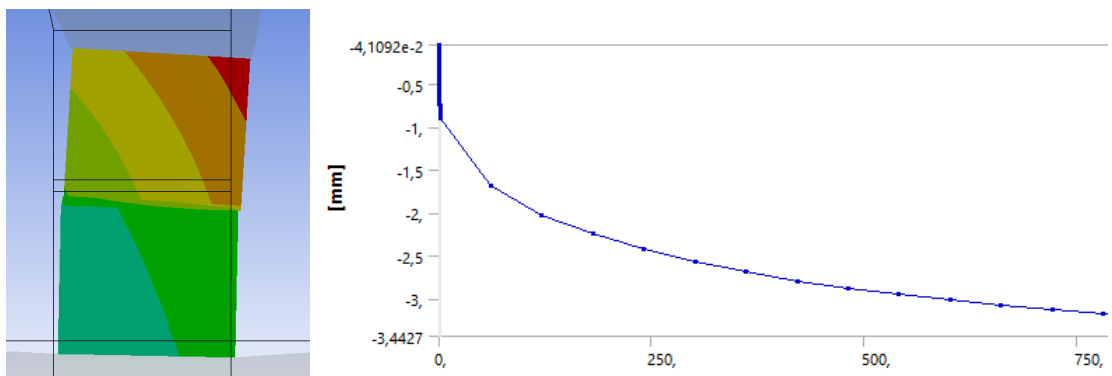
58. ábra: Kifelé dőlő pillérek, alsó függőleges és felső ferde szakasszal
forrás: saját fotó

Az árkádsor lábázat alsó (képlékeny csukló alatti) része kevésbé fordult kifelé, mint a lábázat felső része, ami szinte függőlegesen áll. Ez arra enged következtetni, hogy az alaptest se tud elfordulni a talajban, mert akkor a pillérek fordulási középpontja a felszín közelében lenne. A modellben a talaj $E=8,5$ MPa rugalmassági modulussal lett modellezve, viszont ilyen érték mellett a boltozat terheinek hatására az alaptest a többi alakváltozáshoz képest nagy elfordulásokat végez, ami szembe megy a helyszínen tapasztalt állapottal. Emiatt feltehetően merevebb az árkádsor alatti talaj, mint amire számítottunk. Lehetséges, hogy az árkádsor alatt keményebb, homokos-kavicsos talaj található. Szintén lehetséges, hogy Fathy a 3) alapozási technikát alkalmazva betömörítette a talajt az épület alatt, így növelve a merevségét. Az alaptest és a talaj között a modellben nem tapasztaltunk elcsúszásokat, elválásokat, így a kapcsolatukat kötötten alakítottuk ki. A talajparaméterek megválasztása nemcsak az azonnali, de a vizskózus szakaszban létrejövő alakváltozásokra is hatással van. A puhább homokos-iszap talaj esetén a lábázat alsó

szakasza látványosan elfordul és elmozdul vízszintesen. Homokos-kavics talaj esetén ezek az elmozdulások a lábazat felső részéhez képest elhanyagolhatóan kicsik.



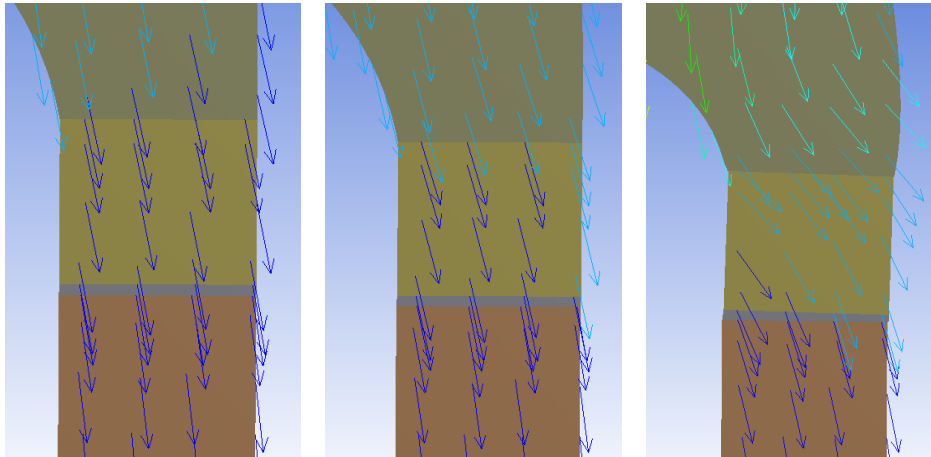
59. ábra: Homokos kavics ($E=40\text{MPa}$, $\nu=0,4$) talajmodellből kapott eredmények
Balra: Lábazat alakváltozásábrája, Jobbra: Kontakt elem vízszintes elmozdulása



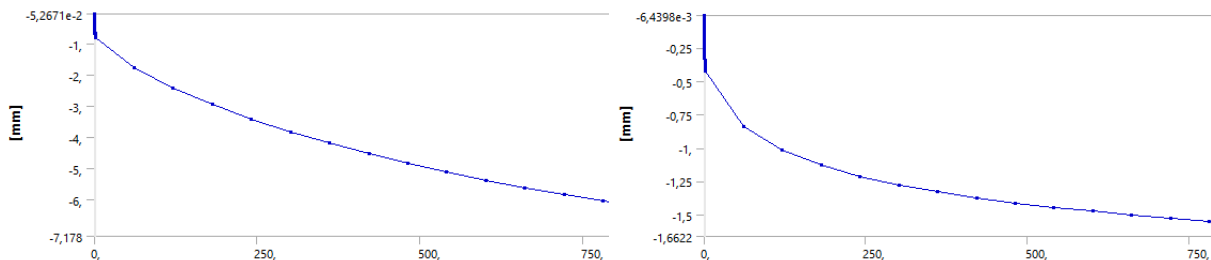
60. ábra: Homokos iszap ($E=16\text{MPa}$, $\nu=0,3$) talajmodellből kapott eredmények
Balra: Lábazat alakváltozásábrája, Jobbra: Kontakt elem vízszintes elmozdulása

Viszkózus alakváltozások és hatásuk a boltozatra

A modellkísérlet elején csak a boltozat viszkoelasztikus viselkedése aktív, mivel a kontakt elemekben nincs elegendő feszültség a képlékenyedéshez. A viszkoelasztikus alakváltozások kezdetén a lábazat alsó és felső része is ugyanolyan irányú alakváltozásokat végez, majd a boltozat kúszásával együtt növekvő vízszintes erő csak a lábazat felső részének vízszintes elmozdulását növeli.

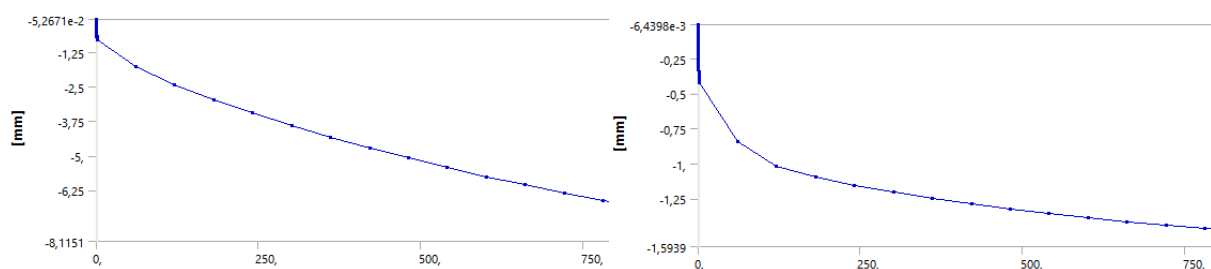


61. ábra: Elmozdulás vektorok, balra: Rugalmas alakváltozásokra, középen: Viszkoelasztikus alakváltozások beléptével, jobbra: Viszkoplasztikus alakváltozások beléptével

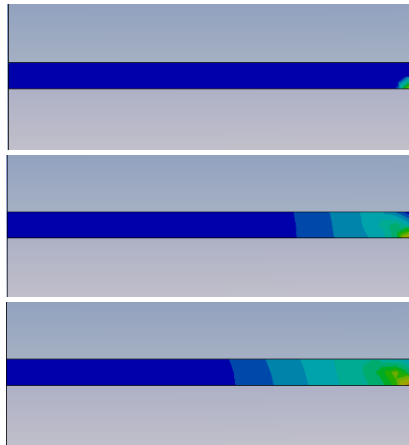


62. ábra: Vízszintes elmozdulások az idő függvényében ha viszkoelasztikus és viszkoplasztikus alakváltozások is vannak

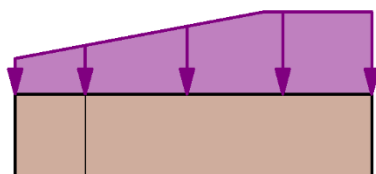
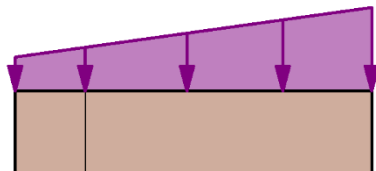
Balra: Boltváll, Jobbra: Kontakt elem alakváltozása



63. ábra: Vízszintes elmozdulások az idő függvényében ha csak viszkoelasztikus alakváltozások vannak Balra: Boltváll, Jobbra: Kontakt elem alakváltozása



64. ábra: Képlékeny alakváltozási zónák terjedése a viszkózus alakváltozások növekedésével



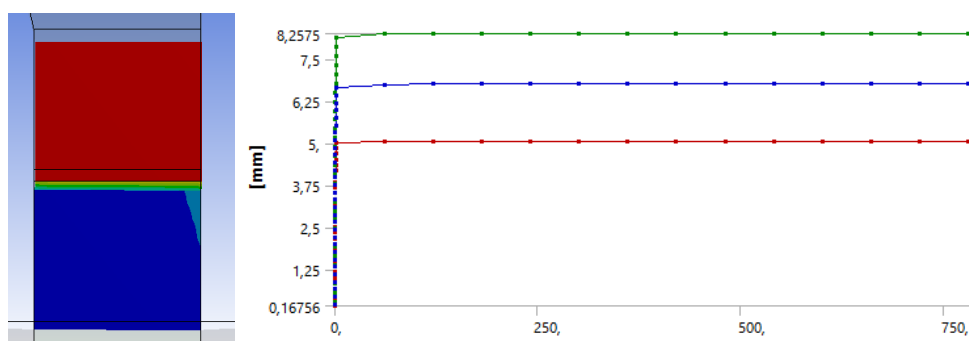
65. ábra: Fezültségrendszer a kontakt elemben
Felül: Rugalmas
Alul: Rugalmas-Képlékeny

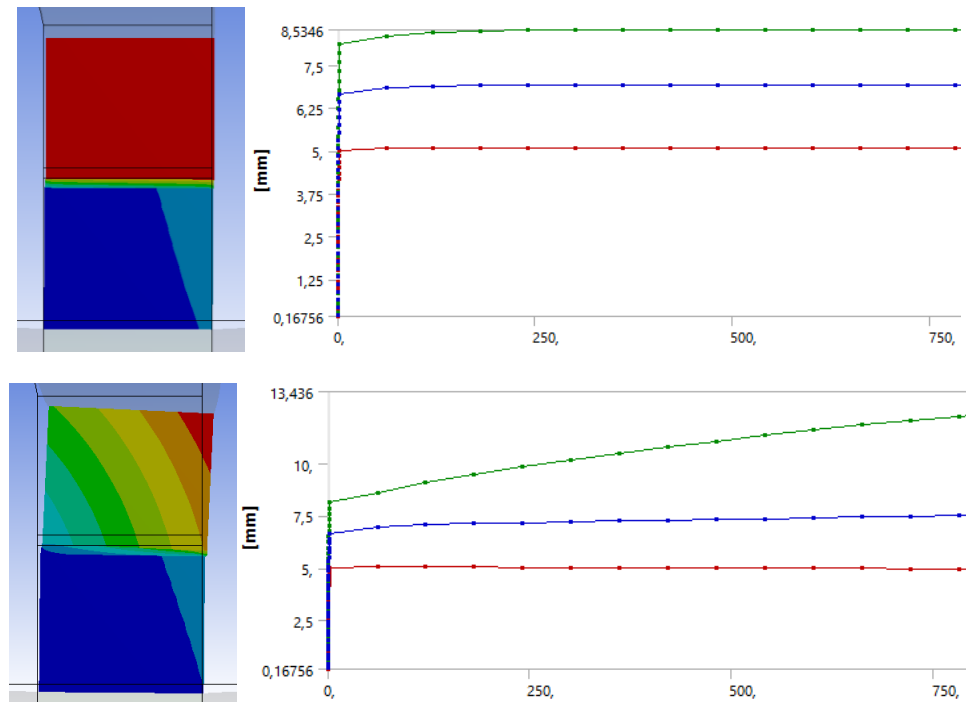
A kontakt elem elmozdulásaira a viszkoplasztikus alakváltozásoknak nincsen hatása, viszont a boltváll alakváltozásait csökkenti. Alapesetben a kontakt elem rugalmas állapotban van és csak az árkádsor egy bizonyos mértékű alakváltozása révén (boltozat viszkoelasztikus alakváltozása) éri el a plasztikus határt. Először a kontakt elemnek az alsó, külső éle kezd képlékenyedni, amely így egyre terjedő képlékeny alakváltozási zónákat alakít ki a kontakt elem belseje felé.

A viszkoplasztikus viselkedés hatására ezek a képlékeny feszültségek leépülnek és ezzel csökkentik a lábazati rész felső részének elfordulását a sima képlékeny modellhez képest. A feszültség-leépülés hatására a kontakt elemben létrejövő képlékeny alakváltozás csaknem a fele annak, ami sima képlékeny anyagmodellnél lenne.

A viszkoplasztikus anyagmodell paramétereinek hosszú távon nincs hatása az árkádsor alakváltozásaira, mivel ugyanabban az állásba áll be, csak az azonos alakváltozások eléréséhez szükséges idő változik meg (a μ és m tényezők csak a relaxációs sebességét változtatják). Így nem csökkenti a képlékeny feszültség relaxáció az alakváltozásokat, csak megnöveli az alakváltozások eléréséhez szükséges időt.

A boltozat viszkoelasztikus paramétereinek közül az α_1 megválasztása nagyban befolyásolja az árkádsor alakváltozásait.

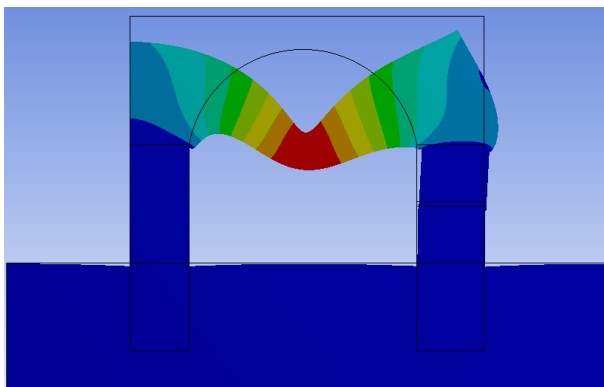




66. ábra: Lábazat alakváltozásai, Piros: minimális, Zöld: maximális, Kék: átlagos

Fent: $0 < \alpha_1 < 0.5$, Középen: $0.6 < \alpha_1 < 0.9$; Lent: $\alpha_1 = 1$

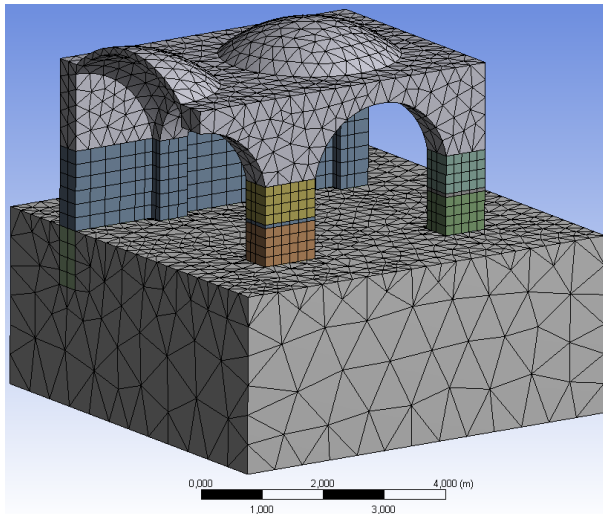
Egyedül az $\alpha_1 = 1$ esetben beszélhetünk lényegesebb kúszásról, így ezzel az értékkel számoltunk tovább. A Prony sorozathoz új tag hozzáadásával $G(t) = G_{initial} * \left(\alpha_0 + \alpha_1 * e^{-\frac{t}{t_{k1}}} + \alpha_2 * e^{-\frac{t}{t_{k2}}} \right)$ a kúszás jellegét nem változtatjuk meg, csak az alakváltozás sebessége változik, így több tag alkalmazása szükségtelen.



67. ábra: Az árkádsor bizonyos mennyiségű kúszása után már csak a boltozat végez függőleges alakváltozásokat

Egy bizonyos mértékű viszkózus alakváltozás után a lábazat nem mozog tovább vízszintes irányban, hanem csak a boltív alakváltozik függőlegesen, így ha az árkádsor kibírja a lábazat kidőléséből származó húzófeszültségeket, akkor a boltozat túlzott függőleges alakváltozása miatt mehet tönkre.

5.3.7. 3D modell



68. ábra: Árkádsor 3D-s végeselem modellje

Az árkádsor pontosabb geometriáját figyelembe vevő 3D-s modellt is készítettünk. Ebben a 27. ábra szerinti geometriát modelleztük meg. A végeselem modellben 3 állás került bele (szimmetria elem használatával 1,5 állás, ezzel is csökkentve a számítási időt). A modell terhei, megtámasztásai és topológiája a 2D-s modellel analóg módon vettük fel. Az anyag és kontakt paraméterek a 2D-s modellel levont következtetések alapján az alábbiak:

- Az árkádsor alatti talaj feltehetően nem iszap, hanem kavicsos-homok, így $E = 40 \text{ MPa}$
- A kontakt elemek az előző fejezetben ismertetett beállításokkal.
- A boltozat viszkoelasztikus paraméterei a következő értékekkel:

$$\alpha_1 = 1,0 \quad t_k = 20 \text{ sec}$$

- A kontakt elem viszkoplasztikus paraméterei a következő értékekkel (m értéke kicsi, μ értéke nagy, hogy a viszkoplasztikus alakváltozások gyorsan lejátszódjanak, viszont, ahogy az előző pontban szó volt róla, ezeknek a paramétereknek hosszú távon nincsen hatásuk az árkádsor alakváltozásaira):

$$\mu = 2,0 \quad m = 0,2$$

5.4. Tönkremeneteli mechanizmus meghatározása



69. ábra: Árkádsor New Baris-ban
forrás: saját fotó

Fathy másik hasonló városa New Baris-ban épült, egy sivatag közepén, távol a Nílustól. New Gournával ellentétben az ottani épületeken nem tapasztalhatók tönkremenetelre utaló jelek. A sivatagi talajok eltérnek a Nílus menti területek talajrétegződésétől. Míg a Nílus mentén a nagyobb plaszticitású homokos, iszapos, agyagok a talaj fő alkotórészei, addig a sivatagban a homokos, kavicsos talaj a jellemző [39]. A sivatagi területeken a talajvíz magas szintjével sem kell számolni a Nílus-menti területekkel szemben. Ennek a városnak a jó állapotából lehet sejteni, hogy mely paraméterek befolyásolhatták a New Gournai épületek tönkremenetelét.

A modellkísérletekből kapott eredményekből a következő tönkremeneteli mechanizmusra következtetünk:

A talajnak nem volt hatása a boltozat tönkremenetelére, mivel a konszolidációja már a tönkremenetelre utaló jelek megjelenése előtt lezajlott, a függőleges és vízszintes alakváltozása nem haladja meg az 0,5-1 cm-t. A modellkísérletekből sejtetően homokos-kavicsra épült az árkádsor, de iszapos talajra való építés esetén sem lenne a talaj hatása domináns.

A vályognak az építési víz hatására kialakuló kúszásának meghatározó hatása van a boltozatok tönkremenetelében, de magában még nem okozna problémát (pl: New Baris). A boltozat kúszása közben az ívmagassága csökken, ezzel egyre nagyobb vízszintes reakcióerő képződik a boltvállban. A boltvállak elmozdulásával húzás keletkezik a boltívekben, aminek a vályog korlátozott húzószilárdsága miatt nem tud ellenállni, így megreped. Úgy tűnik, hogy a lábazatok elég merevséggel rendelkeznek ahhoz, hogy a kúszás miatt megnövekedett vízszintes erőket kisebb alakváltozásokkal felvegyék.

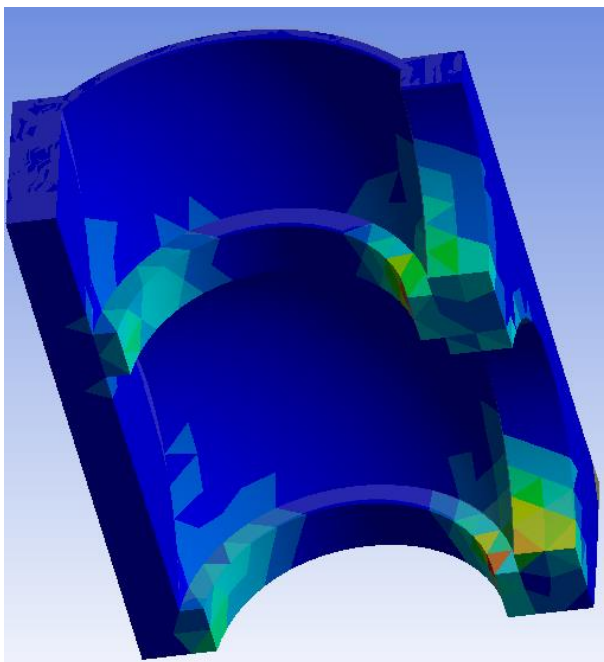
A New Gournai épületek tönkremenetelét a magas talajvíz okozza. A talajvíz kapilláris vízfelszívással eljut a lábazat vályogvakolatú fűgáin keresztül a habarcsrétegig. Az átnedvesedett vályogvakolat elveszti szilárdságának nagy részét, ezzel sokkal hajlékonyabbá teszi a falazott lábazatot. Vizsgálataink és helyszíni tapasztalataink szerint a vízszintes reakcióerőből származó nyomaték a lábazat körülbelül félmagasságában éri el azt a szintet, melyet az átnedvesedett vályoghabarcs már nem tud kis alakváltozásokkal felvenni és így

képlékeny csukló alakul ki ezen a helyen. Emiatt el tud fordulni a lábazat felső része. A képlékeny csukló kialakulása egy öngerjesztő folyamatot indít el, az alakváltozások növekedése növeli az erők külpontosságát, melyek így növelik az alakváltozásokat. Az alakváltozások hatására a boltívekben fellépő húzóerők eléri a vályogfalazat húzási teherbírását és berepednek. Az alakváltozások növekedésével a repedések a teljes keresztmetszetet megrepesztik és az ív záradékában beszakadnak a boltívek.

Ez viszont még nem jelenti az árkádsor teljes tönkremenetelét. A beszakadások körül az erő útja megváltozik, a kupola terhei egyenesen a pillérre vezetődnek le, de ezzel megnövekednek a membránérők a kupolában. Ez a megnövekedett erő a teherbírás kimerülését is eredményezheti a kupolában. A beszakadások körüli szabad peremek kúszása további leválásokat, leomlásokat okozhat, ezzel tovább gyengítve a kupolát.

A felvett modell és a meghatározott tönkremeneteli mechanizmus helyességének igazolására meghatároztuk a rugalmas alakváltozási energiát a szerkezet minden pontjában [40]:

$$U(\epsilon) = \frac{1}{2} * \left(\frac{1-\nu}{\nu} * \frac{E * \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2) + \frac{2E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_x * \epsilon_y + \epsilon_y * \epsilon_z + \epsilon_z * \epsilon_x) + \frac{1}{G} * (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right)$$



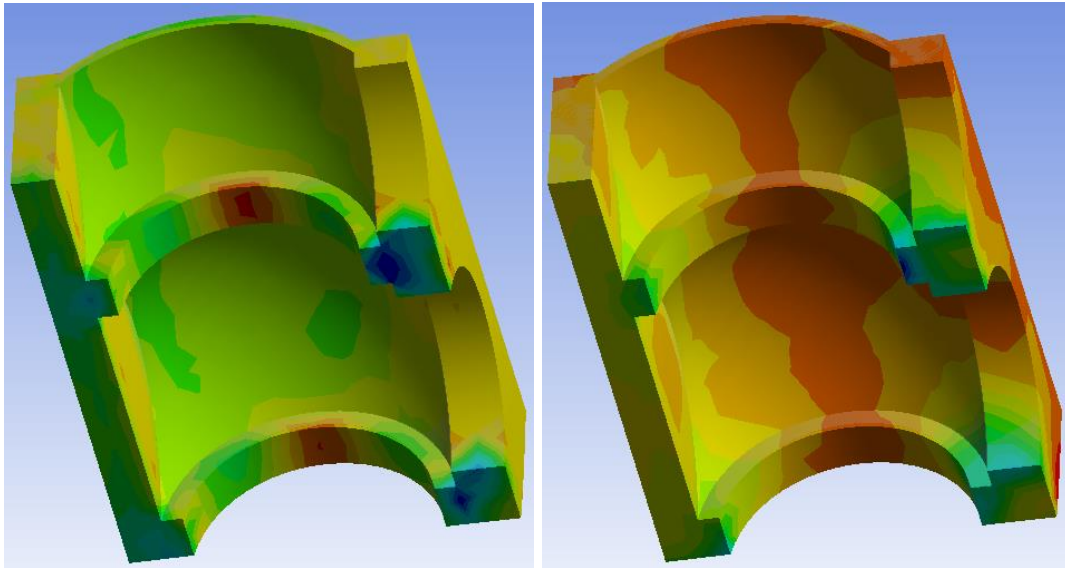
70. ábra: Rugalmas alakváltozási energia eloszlása a boltozatban
Kék: alacsony, Piros: magas

A modellből meghatározott alakváltozási energia maximumai a boltvállaknál adódtak, viszont ezeken a területeken a nyomóerők dominálnak, melyek maximális értékei 0,1-0,2 MPa közé esnek, mely távol áll a vályog nyomó határfeszültségétől (2,5 MPa). A húzó igénybevételekből származó maximális alakváltozási energiák a maximális húzófeszültségek helyein keletkeztek.

A haránt irányú boltívek közepén vízszintes irányú húzófeszültség ébred a boltvállak szétcsúszása miatt. Az alakváltozások növekedésével a húzófeszültségek értéke elérheti az anyag csekély húzószilárdságát és a boltív beszakadhat. A boltozat

hossztengelye mentén, a boltív záródásoknál és a kupolák közepén függőleges irányú húzófeszültségek lépnek fel, mely területeken az alakváltozások növekedésével repedések

léphetnek fel, ez végül a boltív beszakadását eredményezi. Ezek a jelenségek meg is figyelhetők a Khanon, mivel a szélső állásban a haránt és hosszirányú boltívek beszakadtak.



71. ábra: Előjeles feszültségek a boltozatban, Balra: Vízszintes, Jobbra: függőleges
Kék: Legnagyobb nyomás, Piros: Legnagyobb húzás



73. ábra: Beszakadt keresztirányú boltív a Khanban, forrás: saját fotó



72. ábra: Beszakadt hosszirányú boltív a Khanban, forrás: saját fotó

A 2011-es UNESCO-s felmérés szerint is a Khan szélső mezője volt beszakadva, majd a 2019-es bejárásunkon a másik szélső mező beszakadását figyeltük meg. A szélső állásban található sarokpillér hosszirányú vízszintes terheit, nincs ami felvegye, így nemcsak haránt, de hosszirányú elmozdulásai is nagyok. Ebből adódóan a szélső állások vannak a legjobban igénybevéve és így az árkádsor tönkremenetele a szélső állások egymás utáni beszakadásával történik.

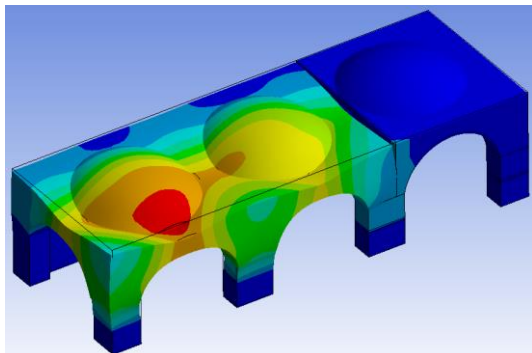
5.5. Eddig alkalmazott rekonstrukciók hatása

A tönkremeneteli mechanizmus ismeretében meghatározhatjuk a rekonstrukciók hatását az árkádsorra.

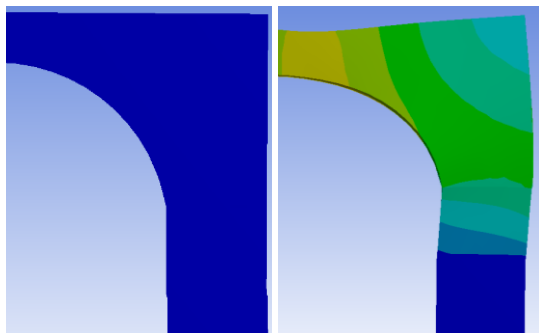
5.5.3. Szélső falazott állás



74. ábra: Kisméretű téglából falazott szélső boltmező, forrás: saját fotó



75. ábra: Árkádsor alakváltozásábrája, a szélső falazott állással



76. ábra: Boltív alakváltozás-ábrája
Balra: A rekonstruált mezőben
Jobbra: A rekonstruált mező melletti mezőben

2011-ben újraépítették a Khan szélső beszakadt mezőjét kisméretű tömör téglából falazva. A lábathoz nem nyúltak hozzá, csak a boltozati részt falazták újra. A rekonstruált kupola nem a Fathy féle geometriával készült, hanem nagyobb ívmagassággal, így a restaurálás hitelessége is kérdéses.

Tömör kisméretű téglafalazat térfogatsúlya 1850 kg/m^3 a vályogfalazat 1700 kg/m^3 súlyával szemben, így a talajban nem keletkezett lényegesen nagyobb plusz terhelés, ami nagyobb támasz elmozdulást okozhatott volna.

A rekonstruált mező és a vályogboltozat együttdolgozása valószínűleg nagyon korlátolt, viszont a rekonstruált mező a mellette lévő mező hosszirányú oldalnyomását fel tudja venni. A kerámia falazatnak sokkal korlátozottabb a kúszása, így az átvizesedett lábazat nem okoz időfüggő alakváltozásokat a rekonstruált mezőben. A rekonstrukció problémája, hogy a másik oldali szélső mező ugyanúgy be tud szakadni idővel, ahogy ezen az oldalon. A belső mezők alakváltozásainak növekedését ez a megoldás nem állította meg, így idővel ezeknek a tönkremenetelével is számolni kell.

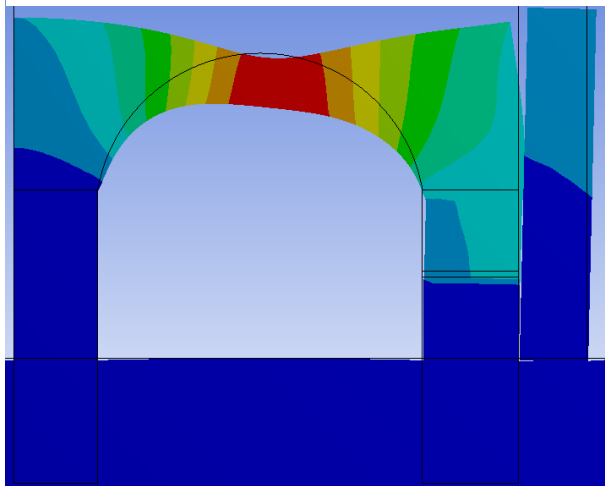
Összefoglalva, a rekonstrukció nem gyorsította a szerkezet tönkremenetelét, de a rekonstrukció környezetén kívül nem volt hatása az árkádsor

viselkedésére, így a folyamatos állapotromlást sem állította meg.

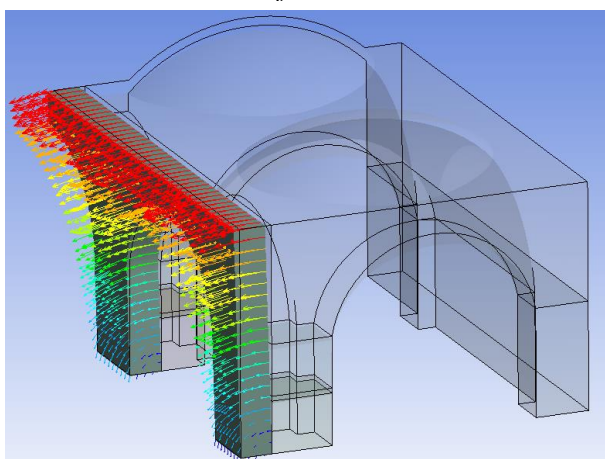
5.5.4. Hosszoldali támfal



77. ábra: Falazott támfal az árkádsor hosszoldalán
forrás: saját fotó



78. ábra: Az árkádsor alakváltozásábrája a támfallal



79. ábra: A támfal elmozdulásai az árkádsor kúszásának következtében

Az árkádsor hosszoldalára egy kb. 40 cm vastag kisméretű téglából falazott támfalat helyeztek el. Valószínűleg felismerték, hogy a pillérek dőlnek kifelé és a boltozat oldalnyomását a pillérek vastagságának megnövelésével akarták elérni. A támfal és a pillérek között nincsen kapcsolat kialakítva, így csak súrlódásos erőátadás lehetséges. A támfalnak valószínűleg nem alakították ki alapozást, így az közvetlenül az altalajon ül. A támfal nem lett megépítve az árkádsor teljes hosszoldalán, a két szélső állásban nincsen támfal.

Az árkádsor és a támfal kapcsolatának hiánya, illetve a támfal viszonylag karcsú kialakítása miatt a boltváll kitolja magával a támfalat is, ami egy felszín közeli forgópont körül könnyen el tud fordulni. A támfal kialakításának másik problémája, hogy a talajt összenyomja a pillérek mellett, ami a lábázat további elfordulását vonhatja maga után.

Összefoglalva, a rekonstrukciónak több negatív hatása volt, mint pozitív, a megnövekedett teher a talajon elősegíthette a lábázat kifelé dőlését és az árkádsor és a támfal kapcsolatának hiánya miatt a támfal nem képes felvenni a boltozat vízszintes terheit.

5.6. Javasolt rekonstrukciós lehetőségek

1) A további vizesedés megállítása utólagos vízszigeteléssel

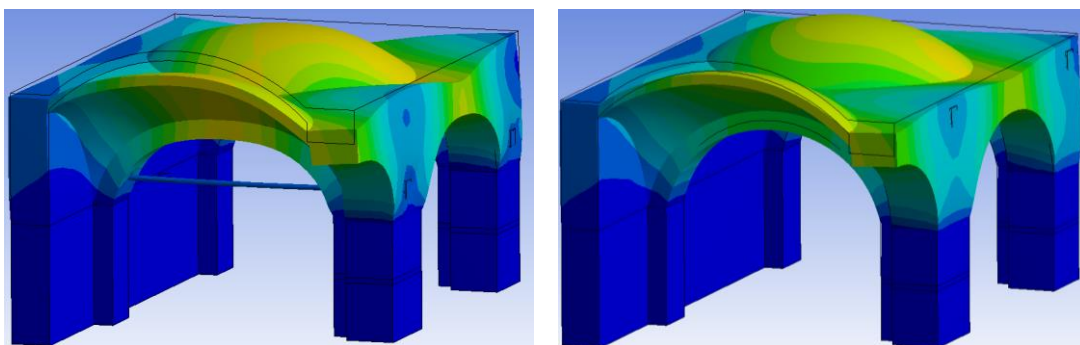
A mechanikai eljárások (szakaszos kibontás, szakaszos átfűrészelés, acéllemez beütés) statikai beavatkozást jelentenek. Valószínűleg újabb repedések keletkeznének a falon, illetve így megszüntetnénk a közvetlen kapcsolatot a lábazat és a felmenő fal között, mely együttműködési problémákat vet fel. A járható út a vegyi falszigetelés lenne, mely a pórusszerkezetet módosítja – víztaszítóvá és/vagy vízzáróvá teszi a falazatot. A tulajdonságmódosító anyagokat injektálással lehet a meglévő szerkezetbe juttatni.

2) Talaj stabilizálás

A falszigetelés helyett alternatív megoldás lehetne az alapozás körüli talaj injektálása is, így a talajnedvesség a lábazatba sem tudna bejutni.

3) Vonórúd rendszer beépítése

Az iszlám építészettől formailag nem idegen, ahogyan azt a kőből épült mecsetek és szent helyek példáin is megfigyeltük. New Gournában a zömök szerkezetekhez eredetileg nem volt indokolt, de a további deformálódás megállításához biztonsággal lehetne alkalmazni. A vonórúdot az ívek záradéka felett is lehetne vezetni, így az eleve kis nyílásmagasság továbbra is szabadon maradhatna. Igazán hatékony megoldást az utólagos vízszigetelés és a vonórúd együttes használata jelentené.



80. ábra: Árkádsor alakváltozás-ábrája vonórúd betételével
Bal: Boltváll alatt, Jobbra: Boltváll fölött elhelyezett vonórúd

4) Újraépítés

A Hassan Fathy Survey Mission-nek köszönhetően rendelkezésünkre áll a pontos felmérési dokumentáció és az American University in Cairo Rare Books and Special Collections jóvoltából az eredeti tervek is. Így a szerkezet újjáépítése a megváltozott talajviszonyoknak megfelelő alapozási rendszerrel készülhetne el Fathy formáit újjáélesztve.

6 Konklúzió

New Gourna terveinek kidolgozásakor Hassan Fathy körültekintően járt el, de csak részben. Nem csak az akkor rendelkezésre álló szakirodalmat tanulmányozta, de számba vette a jelentősebb vályogból épült és még álló antik épületeket az ókortól kezdve. Megismerte a vályog építőanyag és a különböző boltozatok építési technológiáit. A helyszíni adottságok és anyagi körülmények között igazán átgondolt, jó koncepció volt a zömök falszerkezetek és a zsaluzat nélkül építhető térlefedő szerkezetek alkalmazása. A zömök szerkezetek számításaink alapján is megfelelő választások az adott építőanyaghoz.

Ahogy a mérsékelt övi vályogházaknál is, a lábazatot és a felmenő falat vízszigetelő réteggel kellett volna elválasztani, amely gátolja a nedvesség kapilláris felszívódását. Ez a réteg viszont a Model Village házainál elmaradt, hiszen talajvízszint akkoriban még jóval a mai alatt volt (5-10 m-rel!). A víz kérdését mészkő alapozással próbálták kezelni, de csak idővel, 50 évvel később derült ki, hogy nem elég hatékonyan. Nem vették számításba a talajvíz ilyen arányú szintemelkedését – az Asszuáni-gát tervezése is csak az 1950-es évek elején kezdődött.

Számításaink is igazolják, hogy a probléma forrása nem a talaj szerkezetében keresendő, hanem a talajvíz és a lábazat vályoghabarcsának interakciójában. A mészkő lábazat habarcsában felszívódó nedvesség a felmenő faltestbe jutva a vályogtéglá falazatot kúszásra készíti, amely évről-évre látványos szerkezeti deformációt eredményez.

Tovább rontanak a helyzeten, a közelmúltban történt szerkezeti „megerősítések”. A támpillérek anyagjául tömör égetett téglát és kis páraáteresztő képességű, vélhetően cementhabarcsot alkalmaztak. A vályogfalban felszivárgó nedvesség így az új szerkezet felől nem tud távozni, a vályogfal pedig tovább romlik. Ráadásul a megerősítés hatékonysága elenyésző a numerikus vizsgálataink szerint.

Állagmegóvási munkálatokat a meglévő anyag konzerválásával és az új szerkezet anyagának körültekintő megválasztásával lehet végezni. New Gourna épületeinél azonban elképzelhető, hogy a gyökeresen megváltozott talajvíz és környezeti (beépítés) viszonyok miatt a hosszútávon legtartósabb megoldás az újjáépítés lenne.

Általánosan megállapítható, hogy a vályog építőanyag a történelem folyamán mindig is a szegénység, lemaradottság jelképe volt. Néha akad egy-egy építész, vagy szakember, aki felfedezi a benne rejlő lehetőségeket és újszerű vagy hagyományos formákkal próbálja saját korában népszerűsíteni az anyagot. Ahhoz, hogy egy technológia széles körben elterjedjen, bizonyos mértékben a társadalomnak és a gazdaságnak is nyitottnak kell lennie rá. Gondoljunk csak a különböző ipari fejlesztések után kialakuló építési trendekre pl. vasbeton előregyártás,

vagy vázkerámia falazóanyagok. A vályoggal szemben, mai elkényelmesedett világunkban a legnagyobb visszatartó erő a folyamatos odafigyelés, karbantartás igénye. A bevezető részben említett kutatóintézetek és szervezetek létrejötte, és folyamatos munkája viszont arra enged következtetni, hogy a vályogépítésnek igenis van jövője. A tudományban még igencsak kiaknázatlan témakör ez, és sok lehetőséget rejlik benne. A különböző éghajlatokon való alkalmazásának technikáit, stabilizálási módjait különösen érdemes vizsgálni, és vizsgálják is a kutatók. Természetes vagy mesterséges tulajdonságmódosító anyagokat használjunk? Hol van határ, ahol még vályognak nevezzük? Fathy projektjei is érintik a témát, hiszen más körülmények között épült a sivatag közepén New Baris, ahol a szinte folyamatos erős, homokos szél dominál kevés esővel; New Gourna, ahol mára derült ki a talajnedvességgel és talajvízzel szembeni védelem fontossága; vagy Új-Mexikó, ahol ritka, de heves esőzésekkel kell számolni. Európában a mérsékelt övi éghajlaton épült vályogházaknál már megszoktuk, a vízálló lábazatokat és a nagy túlnyúló ereszeket, de talán nem ez az egyetlen járható út. A vályogépítés jövőjét tehát a széleskörű szemléletformálás és a tudásanyag terjesztése, fejlesztése jelentheti.

7 Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket szeretnénk kifejezni témavezetőinknek, Vasáros Zsoltnak és az Ipartanszéknek, illetve Hegyi Dezsőnek és a Sziltanszéknek, hogy lehetővé tették számunkra az egyiptomi utazást, ahol nem csak rengeteg szakmai, de kulturális élménnyel is gazdagodhattunk. Külön köszönet az Ipartanszéknek a kiutazás szervezéséért és finanszírozásáért. Vasáros Zsolt avatott be minket Hassan Fathy munkásságába és a téma iránti lelkesedését ránk is átragasztotta. Megosztotta velünk a Hassan Fathy Survey Mission korábbi eredményeit, felmérési fotóit. Hegyi Dezső a helyszíni “szakértést” és itthoni munkánkat felügyelte, egyengette. Köszönjük harmadik konzulensünknek, Orbánné Csicsely Ágnesnek, a vályoggal kapcsolatos észrevételeit, tanácsait. Köszönjük Árva Péternek, hogy a falazatok modellezéséhez hasznos tanácsokkal látott el minket.

Hálánkat fejezzük ki továbbá Móczár Balázsnak (Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék), aki az anyagvizsgálatokhoz nyújtott segítséget, illetve Csanády Dánielnek (Építőanyagok és Magasépítés Tanszék), aki a mérőedényt biztosította.

8 Felhasznált irodalom

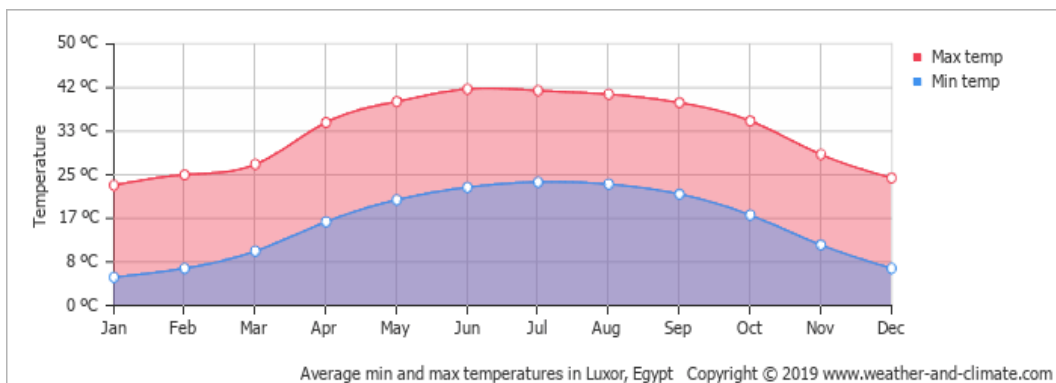
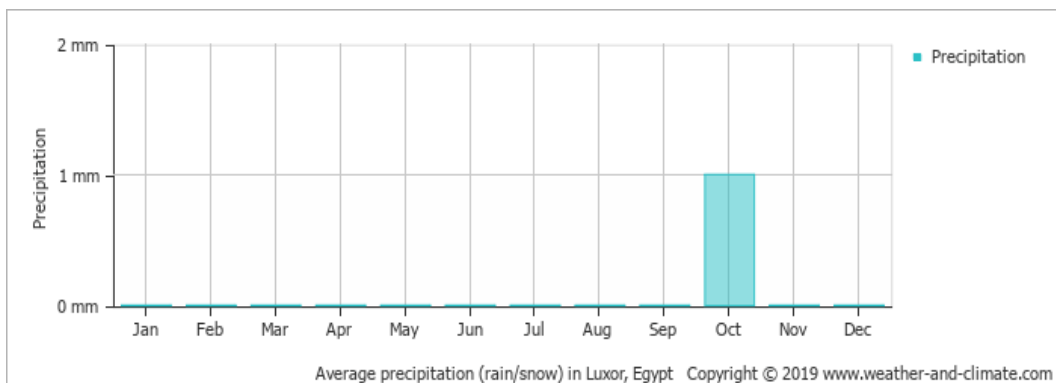
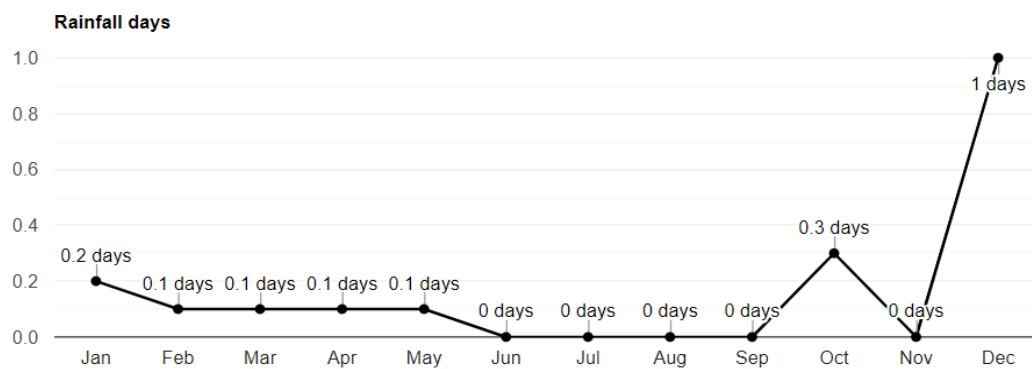
- [1] Vasáros Zs.: Anyagok régi-új szerepben - Hassan Fathy építésze, Országépítő, 2019/1 p. 6-13.
- [2] Minke, G.: Building With Earth, Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel, Switzerland, 2006
- [3] Damluji, S. S. – Bertini, V.: Hassan Fathy: Earth & Utopia, Laurence King Publishing, 2018
- [4] Serageldin, I.: Hassan Fathy, The Bibliotheca Alexandria, Alexandria, 2007
- [5] Steele, J. (1997): An Architecture for People, The Complete Work of Hassan Fathy, Thames & Hudson Ltd, London, 1997
- [6] El-Wakil, L. (szerk.): Hassan Fathy: An Architectural Life, The American University in Cairo Press, Cairo, 2018
- [7] Hegyi D.: Boltívek és boltozatok, Különleges tartószerkezetek egyetemi jegyzet kézirat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 20112
- [8] Van Beek, G.: “Arches and Vaults in the Ancient Near East.” Scientific American, vol. 257, 1987/1, pp. 96–103.
- [9] Pattantyús-Ábrahám Á. (2011): Boltozatok és kupolák, TERC Kiadó, Budapest, 2011
- [10] Fathy, H.: Architecture for the Poor, An Experiment in rural Egypt, The University of Chicago, Chicago, Illinois, 1973 (reprint)
- [11] American University in Cairo Rare Books and Special Collections
- [12] Briggs, M. S.: Muhammadan Architecture in Egypt and Palestine, Clarendon Press, Oxford, 1924
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/El_Bagawat 2019. 09.15.
- [14] O. Csicsely Á.: Vályogfalak kísérleti és elméleti teherbírásvizsgálata, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építészmérnöki kar, Doktori (Ph.D.) Értekezés, Budapest, 2006
- [15] Medgyasszay P.: A vályogépítés építésügyi kérdései és kérdőjelei, Országépítő 2016/03 pp. 38-43, 2016
- [16] King, B.: Review of Earthen Building Codes and Standards from Around the World, 2006
- [17] Molnár V.: A vályog és a favázás vályogépítészet, Nyugat-Magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki kar, Doktori (Ph.D.) Értekezés, Sopron, 2004.
- [18] Rauch, M.: Refined Earth: Construction & Design with Rammed Earth, Eberl Print GmbH, Immenstadt, 2017
- [19] Pontificia Universidad Católica del Perú, Experimental Test on Adobe Material, 2005
- [20] Illampas R. – Ioannou I. – Charnpis D. C.: A study of the mechanical behaviour of adobe masonry, Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII, 2011

- [21] Molnár V.: A vályog minősítő vizsgálatai, Magyar Építőipar, 1998/9-10. szám
- [22] DIN 18952, Baulehm, Deutsche Normen, 1956 május
- [23] Clifton, J.R. – Davis, F.L.: TN996 Mechanical Properties of adobe, National Bureau of Standard, U.S., 1979
- [24] Hammad, M.A.: Geological map of Egypt. Appendix 1. Soil Survey Papers no. 11, 1975
https://esdac.jrc.ec.europa.eu/images/Eudasm/Africa/images/maps/download/afr_egsma2.jpg,
2019. 10. 15.
- [25] Bakr, N. – Bahnassy, M. H.: Egyptian Natural Resources, The Soils of Egypt, Springer, Cham, Switzerland, 2019
- [26] Szűcs M.: Föld- és vályogfalak építése, Építésügyi Tájékoztatási Központ Kft, Budapest, 1997
- [27] Buzás I. (szerk.): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata. INDA 4231 Kiadó, Budapest, 1993.
- [28] <http://whc.unesco.org/en/activities/637> 2019. 10. 11.
- [29] <http://fathyheritage.over-blog.com/article-emergency-stabilization-measures-on-the-Khan-76181137.html> 2019. 10. 05.
- [30] Árva P. – Sajtos I.: Kitöltött és Kitöltetlen Állóhézagú Falazat Alakváltozási Jellemzőinek Meghatározása, Akadémia Kiadó, Budapest, 2012
- [31] Magenesse, G. – Galasco, A. – Penna, A. – Rota, M.: Experimental Characterisation of Stone Masonry Mechanical Properties, ResearchGate, 2014
- [32] Cuomo, M.: Estimate of the Mechanical Properties of Stone Masonry Using Homogenization Techniques, 10th IB2Mac, 1994
- [33] Abu Al-Izz, M.S.: Landforms of Egypt, The American University in Cairo Press, 1971
- [34] Hesham A.H. Ismaiel, Geotechnical Investigations of Sub-Grade Soils at the Connector Road, New Tiba City, Luxor, Egypt, Scientific Research Publishing, Open Journal of Geology, 2018
- [35] Ismaiel, H. A. H.: Geotechnical Evaluation of Sub-Grade Soils at the Cemeteries Area, New Tiba City, Luxor, Egypt, Geosciences, 2013
- [36] Ahmed, A., - Fogg, G.E.: The impact of groundwater and agricultural expansion on the archaeological sites at Luxor, Egypt, ResearchGate, Journal of African Earth Sciences, 2014
- [37] Campos, E. H.: A Groundwater Flow Model for Water Related Damages on Historic Monuments–Case Study West Luxor, Egypt, Vatten, 2009
- [38] World Monument Fund, New Gourná Village, Conservation and Community, 2011
- [39] Kaliszky S. – Kurutzné Kovács M. – Szilágyi Gy.: Szilárdságtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2000

- [39] El-Ramady H. – Alshaal, T. – Bakr, N. – Elbana T., Mohamed, A. – Aziz Belal, A.: Soils of Egypt, Springer 2018
- [40] Kaliszky S.: Képlékenységtan, Akadémia Kiadó, Budapest, 1975
- [41] Mózes Gy. – Vámos E.: Reológia és Reometria, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1968
- [42] Xia, Z. – Chowdhuri, M.A.K.: Analytical Solution for Viscoelastic / Viscoelastic (PVC/Epoxy) Bonded Joint, Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress, 2014
- [43] Farkas J.: Talajmechanika és Alapozás, Műegyetem Kiadó, Budapest, 1997
- [44] Kézdi Á.: Talajmechanika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1972
- [45] <https://en-gb.topographic-map.com/maps/duel/Luxor/> 2019. 09. 30.
- [46] Döven, M.S. – Kafkas, U.: Micro modelling of masonry walls by plane bar elements for detecting elastic behaviour, ResearchGate, 2017
- [47] Pulatsu, B. – Lourenco, P. B. – Martins Bretas, E.: Discrete element modeling of masonry structures: Validation and application, ResearchGate, 2016
- [48] <http://www.geotechdata.info/parameter/soil-young%27s-modulus.html> 2019. 10. 11.
- [49] https://structx.com/Soil_Properties_004.html 2019. 10. 11.
- [50] <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/table-of-ultimate-friction-factors-for-dissimilar-materials-01/> 2019. 10. 11.
- [51] <https://www.messynessychic.com/2014/11/12/the-floating-basket-homes-of-iraq-a-paradise-almost-lost-to-saddam/> 2019. 09. 10.

1. Melléklet: Klímadiagramok

Average rainfall days Luxor, Egypt



forrás: www.weather-and-climate.com (2019.05.15.)

2. Melléklet: Colonel Debes kísérlet kivonat

A vályogtéglák öntöttvas formákban, egyszerű sajtolással készülnek. A téglákat 7 napig hagyják száradni a laboratóriumi helyiségben, majd a szabadban szárítják.

"A" típusú téglá: iszapos agyag + különböző szemcseméretű homok

| | homok- tartalom % | Feszültségek Mpa | | | |
|--------------------------------------|----------------------|------------------|--------|--------|---------|
| | | 7 nap | 30 nap | 90 nap | 180 nap |
| nagyon finom homok (fine sand) | 20 | 4,31 | 5,58 | 5,46 | 5,10 |
| | 40 | 3,76 | 4,31 | 3,78 | 3,35 |
| | 60 | 2,25 | 2,78 | 2,48 | 2,35 |
| | 80 | 0,60 | 0,60 | 0,45 | 0,44 |
| Finom homok (small sand) | 20 | 4,14 | 6,01 | 5,00 | 4,61 |
| | 40 | 3,28 | 4,16 | 3,56 | 2,84 |
| | 60 | 2,05 | 2,89 | 2,22 | 2,06 |
| | 80 | 1,10 | 1,15 | 1,29 | 1,32 |
| Közepes homok (Medium sand) | 20 | 3,70 | 4,78 | 4,11 | 4,05 |
| | 40 | 2,69 | 3,47 | 2,92 | 2,57 |
| | 60 | 1,82 | 2,03 | 2,46 | 1,67 |
| | 80 | 1,22 | 1,13 | 1,16 | 1,18 |
| Durva homok (Large sand) | 20 | 3,22 | 3,57 | 2,63 | 3,16 |
| | 40 | 1,72 | 1,87 | 2,15 | 1,67 |
| | 60 | 0,83 | 1,28 | 1,17 | 0,72 |
| | 80 | 0,60 | 0,84 | 0,46 | 0,46 |

"B" típusú téglá: iszapos agyag + különböző szemcseméretű homok + szalma

| homok- tartalom [%] | szalma- tartalom [%] | Feszültségek [Mpa] | | | |
|------------------------|-------------------------|--------------------|--------|--------|---------|
| | | 7 nap | 30 nap | 90 nap | 180 nap |
| 5 | 1 | 3,35 | 5,26 | 4,71 | 4,64 |
| | 1,75 | 3,24 | 4,71 | 4,25 | 4,50 |
| | 2,5 | 2,94 | 4,41 | 3,92 | 4,14 |
| | 5 | 2,79 | 3,92 | 3,63 | 3,49 |
| 20 | 1 | 3,18 | 4,32 | 3,95 | 3,97 |
| | 1,75 | 3,63 | 4,75 | 4,56 | 4,66 |
| | 2,5 | 3,14 | 4,37 | 3,69 | 3,82 |
| | 5 | 2,45 | 2,65 | 3,43 | 3,35 |
| 40 | 1 | 3,00 | 3,59 | 3,38 | 3,47 |
| | 1,75 | 3,14 | 3,63 | 3,53 | 3,51 |
| | 2,5 | 3,33 | 3,90 | 3,75 | 3,53 |
| | 5 | 2,16 | 3,14 | 2,94 | 2,76 |

Colonel Debes – kísérleti eredmények, kivonat forrás: [10]

3. Melléklet: Modellben alkalmazható anyagmodellek összehasonlítása

E – Young modulus [MPa]

ν – Possion (harántkontrakciós) tényező [–]

G – Nyírási rugalmassági modulus [MPa] $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$

σ_y – Folyási feszültség [MPa] (Feltételezett, hogy konstans érték)

ϵ_e – Alakváltozás rugalmas része [–]

ϵ_p – Alakváltozás plasztikus része [–]

ϵ – Teljes alakváltozás [–] $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$

E_t – Tangens (rugalmassági) modulus [MPa]

$\dot{\epsilon}$ – Alakváltozás sebesség [–]

σ_k – Konstans feszültségérték [MPa]

μ – Viszkózus dugattyú dinamikus viszkozitási tényezője [Poise]

t_r – Relaxációs idő [s] $t_r = \frac{\mu}{G}$

t – Idő [s]

σ_0 – Kezdeti feszültség [MPa]

$\dot{\epsilon}_{vp}$ – Viszkoplasztikus alakváltozás sebesség [–]

N – Görbe illesztési paraméter [–]

m – Deformáció sebesség keményedési paraméter [–]

A, Q, R, T, ξ, s, m – Anyagi és állapot paraméterek

| Megnevezés | Képlet | Pozitívum | Negatívum |
|---|--|---|--|
| Rugalmas anyagmodellek | | | |
| Hooke modell, lineáris | $\sigma = E * \epsilon$ | Lineáris analízis, kevés paraméter | Korlátozott érvényesség |
| Neo-Hookean modell, nem-lineáris | $\sigma = G * \left(\epsilon - \frac{1}{\epsilon^2} \right)$ | Nemlinearitás modellezhető | Nemlineáris analízis |
| Képlékeny anyagmodellek | | | |
| Bilineáris modell, izotróp keményedés | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \sigma = E * \epsilon_e + E_t * \epsilon_p \end{cases}$ | keves paraméter, kevés numerikus számítási munka | Nemlineáris anyagra erős közelítés |
| Multilineáris modell, izotróp keményedés | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \sigma = E * \epsilon_e + \sum E_{ti} * \epsilon_{pi} \end{cases}$ | Nemlineáris plasztikus viselkedés jól modellezhető | Sok paraméter, sok számítás |
| Viszkoelasztikus anyagmodellek | | | |
| Kelvin-Voigt modell | $\text{Ha } \dot{\sigma} = 0, \text{ akkor } \epsilon = \frac{\sigma_k}{G} \left(1 - e^{-\frac{t}{t_r}} \right)$ | Egyszerű paraméterezés, jó kúszásra | Nincs rugalmas alakváltozás |
| Maxwell modell | $\text{Ha } \dot{\epsilon} = 0, \text{ akkor } \sigma = \sigma_0 * e^{-\frac{t}{t_r}}$ | Egyszerű paraméterezés, rug alakv. | Relaxációs függvény, nem kúszás |
| Prony-sorozat | $\sigma = 2G(t)(1 + \nu) * \epsilon$ $G(t) = G_0 * \left(\alpha_0 + \sum \alpha_i * e^{-\frac{t}{t_r}} \right)$ | Egyszerű paraméterezés, rugalmas alakváltozás | Bonyolultabb paraméter kiválasztás |
| Viszkoplasztikus anyagmodellek | | | |
| Norton-Hoff modell | $\sigma = \mu * (\dot{\epsilon}_{vp})^{\frac{1}{N}}$ | Egyszerű számítás, kevés paraméter | Nincs rugalmas alakváltozás |
| Bingham-Norton modell | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu} \left(\frac{ \sigma }{\mu} \right)^{N-1} * \left(1 - \frac{\sigma_y}{ \sigma } \right) \end{cases}$ | Rugalmas + viszkoplasztikus szakasz, kevés paraméter | Nem alakv.seb. függő, nem csökken a kúszás |
| Elastoviszko-plasztikus modell, keményedő | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + f(\sigma, \sigma_y, \dot{\epsilon}_{vp}) \end{cases}$ | Rug.+vp. , csökkenő kúszási alakváltozás | Több param., nem alakv.seb. függő |
| Alakváltozási sebesség függő, Perzyna modell | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \dot{\epsilon}_{vp} = \mu * \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} \end{cases}$ | Rug.+vp. , csökkenő kúszási alakváltozás, jól paraméterezhető | Sok számítási munka |
| Anand modell | $\begin{cases} \text{Ha } \sigma < \sigma_y & \sigma = E * \epsilon \\ \text{Ha } \sigma > \sigma_y & \dot{\epsilon}_{vp} = A e^{-\frac{Q}{RT}} \left(\sinh \left(\frac{\xi \sigma}{S} \right) \right)^{\frac{1}{m}} \end{cases}$ | Pontosan leírja a kúszási jelenséget, Jól paraméterezhető | Bonyolult paraméterek, sok számítási munka |

11. táblázat: Anyagmodellek