

A KLASSZIKUS KOR MATEMATIKÁJA.

Az első enciklopédia

Klukovits Lajos

TTIK Bolyai Intézet

2019. március 11.

Előzmények 1.

1.

Euklidesz az Akadémián tanulhatott, de Alexandriában dolgozott i.e. 300 körül.
2.

A részben a klasszikus kor után élt (munkásságának zöme már ide esett), de annak szellemében írta könyveit (Elemek, Kúpszeletek, Optika, stb.).
3.

Az Elemek a klasszikus kor matematikája egy részének enciklopédikus összefoglalása, mai szóhasználattal **nem formális axiómatikus elméletként**.
4.

Sok szerző művéből állította össze.

4.1

khioszi Hippoktatesz, a platonista Leon könyvei,

4.2

Eudoxos és Theaitetosz számos eredményét építette be.

Előzmények 2 .

1.

Milyen formában maradt fenn?

1.1

A megírás korából nincs fennmaradt kézirat.

1.2

Későbbi görög kommentárok: az alexandriai Heron, Pappos (i.sz. 3. sz.), az alexandriai Theon és a neoplatonista Proklos (i.sz. 4. és 5. sz.) a legjelentősebbek.

1.3

A tőlük származó görög nyelvű töredékek és a későbbi arab fordítások az autentikus források.

1.4

A legrégebbi teljes kézirat 10. századi és a Vatikáni Könyvtárban őrzik. Görög nyelvű változat a Theon előtti időkből.

1.5

Bath-i Adelard latin fordítása 1142.
2.

Euklidesz többi könyve jelenleg ismeretlen, a Kúpszeletek Apolloniusz könyvének elején részben olvasható.

Az Elemek szerkezete.

- 13 „könyvből” áll.
- Kevés kivétellel mindegyik definíciókkal kezdődik.
- Ezeket változó számú tétel és azok szigorú bizonyítása követi.
- Az első könyv más: a definíciók után 5 **posztulátum** (mai terminológiával axióma) majd 9 **axióma** (ma axióma séma) következik a tételek előtt.
- **Megjegyzés.** Az axiómák száma kiadásról-kiadásra változhat, olykor a posztulátumokhoz csatolják.
- Klasszikus kor.

TTIK Bolyai Intézet

Az I. Könyv.

Definíciók.

- I.1.D Pont az, aminek nincs része.
- I.2.D A vonal szélesség nélküli hosszúság.
- I.4.D Egyenes vonal az, amelyik a rajta levő pontokhoz viszonyítva egyenlően fekszik.
- I.7.D Síkfelület az, amelyik a rajta levő egyenesekhez viszinyítva egyenlően fekszik.
- I.8.D A síkszög két olyan egysíkbeli vonal egymáshoz való hajlása, amelyek egymást metszik, és nem fekszenek egy egyenesen.
- I.10.D Ha egy egyenesre egyenest állítunk úgy, hogy egyenlő mellékszögek keletkeznek, akkor a két egyenlő szög derékszög, és az álló egyenest merőlegesnek mondjuk arra, amelyen áll.

Az I. Könyv.

Definíciók.

- I.11.D Tompaszög az, amelyik nagyobb a derékszögnél.
- I.15.D A kör síkbeli alakzat, amelyet egy vonal vesz körül [ezt nevezzük körvonalnak] úgy, hogy az e vonal és egy, az alakzat belsejében fekvő pont közé eső szakaszok egyenlők egymással.
- I.19.D Egyenes vonalú alakzatok (sokszögek) azok, amelyeket egyenes vonalak vesznek körül, háromoldalúak, amelyeket három, négyoldalúak, amelyeket négy, sokoldalúak pedig, amelyeket négynél több oldal vesz körül.
- I.23.D Párhuzamosok azok az egyenesek, amelyek ugyanabban a síkban vannak és mindkétoldalt végtelenül meghosszabbítva egyiken sem találkoznak.

Az I. Könyv.

Posztulátumok.

- P1. Követeltessék meg, hogy minden pontból minden ponthoz legyen egyenes húzható.
- P2. És hogy véges egyenes vonal egyenesben folytatólag meghosszabbítható legyen.
- P3. És hogy minden középponttal és távolsággal legyen kör rajzolható.
- P4. És hogy minden derékszög egymással egyenlő legyen.
- P5. És hogy ha két egyenest úgy metsz egy egyenes, hogy az egyik oldalon keletkező belső szögek (összegben) két derékszögnél kisebbek, akkor a két egyenes végtelenül meghosszabbítva találkozzék azon az oldalon, amerre az (összegben) két derékszögnél kisebb szögek vannak.

Az I. Könyv: az axiómák.

- A1. Amik ugyanazzal egyenlők, egymással is egyenlők.
- A2. Ha egyenlőkhöz egyenlőket adunk hozzá, az összegek egyenlők.
- A3. Ha egyenlőkből egyenlőket veszünk el, a maradékok egyenlők.
- A4. Ha nem egyenlőkhöz egyenlőket adunk hozzá, az összegek nem egyenlők.
- A5. Ugyanazok kétszeresei is egyenlők.
- A6. Ugyanannak a fele részei egyenlők egymással.
- A7. Az egymásra illeszkedők egyenlők egymással.
- A8. Az egész nagyobb a résznél.
- A9. Két egyenes nem fog közre területet.

Az I. Könyv.

I.4. Tétel.

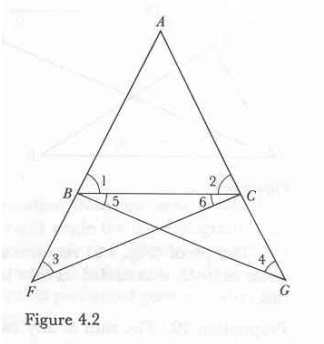
Ha két háromszögnek két-két oldala egyenlő, és egy-egy szöge egyenlő, az, amelyet az egyenlő oldalak fognak közre, akkor az alapok is egyenlők, és a háromszögek is egyenlők, és a többi szög is páronként egyenlő, amelyekkel szemben az egyenlő oldalak fekszenek.

Az I. Könyv.

I.5. Tétel.

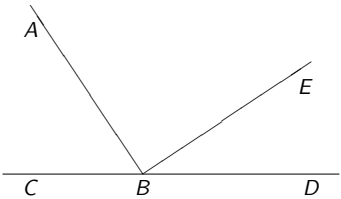
- ▶ Az egyenlőszárú háromszögben az alapon fekvő szögek egyenlők.
- ▶ **Megjegyzés.** E tétel tankönyvi bizonyításai a száraz alkotta szög felezőjét használja, DE Euklidesz bizonyítása szebb és egyszerűbb:

Az I.5. Tétel bizonyítása.



I.14. Tétel.

Ha valamely egyenesen levő pontnál két egyenes fekszik nem ugyanazon az oldalon, és két derékszöggel egyenlő szöget alkotnak egymás mellett, akkor (ugyanazon az) egyenesen van a két egyenes.



Az I. Könyv: tételek.

I.29. Ha párhuzamos egyeneseket metsz egy egyenes, akkor egymással egyenlő váltószögek keletkeznek, és a szemkötti belső szöggel egyenlő külső szög keletkezik, és ugyanazon az oldalon (együtt) két derékszöggel egyenlő belső szögek keletkeznek.

- **Megjegyzés.** Itt hivatkozik először az V. posztulátumra!

I.41. Ha egy paralelogrammának ugyanaz az alapja, mint egy háromszögnek, és ugyanazon párhuzamosok közt fekszik, akkor a paralelogramma kétszerese a háromszögnek.

Az I. Könyv: tételek.

I.47. A derékszögű háromszögekben a derékszöggel szemkötti oldalra emelt négyzet egyenlő a derékszöget közrefogó oldalakra emelt négyzetek összegével.

- **Megjegyzés.** Íme a nevezetes „Pithagorasz tétel”, amelyet már évszázadok óta ismernek.

I.48. Ha egy háromszögben az egyik oldalra emelt négyzet egyenlő a háromszög másik két oldalára emelt négyzetek összegével, akkor derékszög a háromszög másik két oldala által közrefogott szög.

- **Megjegyzés.** Ez pedig a megfordítása.

Az I.47. Tétel bizonyítása.

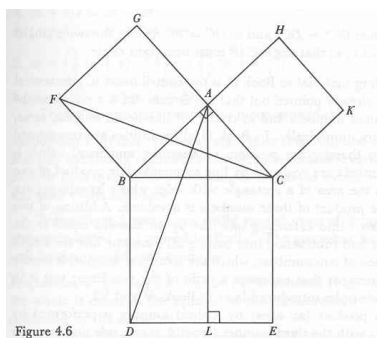


Figure 4.6

Az I.47. Tétel bizonyítása.

- A G, A, C és a B, A, H pontok egy-egy egyenesen vannak az I.14. Tétel szerint.
- Az FBC háromszög és az $FBAG$ négyzet ugyanazon párhuzamosok közt fekszik, alapjuk közös.
- Az I.41. Tétel alapján: FBC fele af $FBAG$ -nek.
- $FBC_{\Delta} \cong ABD_{\Delta}$ (I.4. Tétel.)
- A BDL téglalap és az ABD háromszög alapja ugyanaz és ugyanazon párhuzamosok közt fekszenek.
- I.41. $\Rightarrow$ a háromszög fele a téglalapnak.
- 5. Axióma $\Rightarrow$ az $FBAG$ négyzet egyenlő a BDL téglalappal.
- Hasonlóan: az $ACKH$ négyzet egyenlő az LEC téglalappal.
- A 2. Axióma alapján a bizonyítás kész.

A II. Könyv (a „geometriai algebra”).

Az 1. - 10. Tételek mai jelölésekkel.

$$a(b + c + d + \dots) = ab + ac + ad + \dots \quad (1)$$

$$(a + b)a + (a + b)b = (a + b)^2 \quad (2)$$

$$(a + b)a = ab + a^2 \quad (3)$$

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2 \quad (4)$$

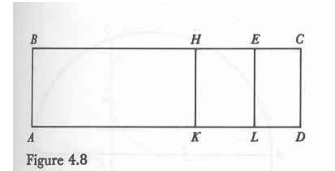
$$ab + \left(\frac{1}{2}(a + b) - b\right)^2 = \left(\frac{1}{2}(a + b)\right)^2 \quad (5)$$

$$(2a + b)b + a^2 = (a + b)^2 \quad (6)$$

A II. Könyv tételei eredeti szöveggel.

II.1. Ha van két szakasz, és az egyiküket valahány részre osztjuk, akkor a két szakasz által közrefogott téglalap egyenlő a fölősztatlan szakasz és az egyes részek által közrefogott téglalapok összegével.

► **Bizonyítás.**

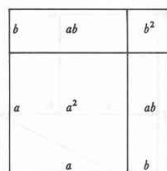


► Formalizálva: $a(b + c + d + \dots) = ab + ac + ad + \dots$

A II. Könyv tételei eredeti szöveggel.

II.4. Ha egy egyenesszakaszt tetszőlegesen kettéosztunk, akkor a teljes szakaszra emelt négyzet egyenlő az egyes részekkel szerkesztett négyzeteknek meg a két rész által közrefogott téglalap kétszeresének összegével.

► **Bizonyítás.**

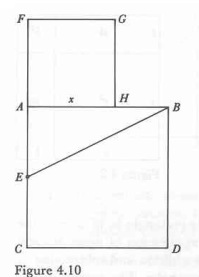


► Formalizálva: $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$

A II. Könyv tételei eredeti szöveggel.

II.11. Osszuk ketté egy adott szakaszt, hogy a teljes szakasz és az egyik rész által közrefogott téglalap egyenlő legyen a másik részre emelt négyzettel.

► **Bizonyítás.**



A III. Könyv (elemi geometria) Definíciók.

- III.1.D** Körök egyenlők, ha átmérőik egyenlők vagy a sugaraik egyenlők.
- III.2.D** Azt mondjuk, hogy egy egyenes érint egy kört, ha metszi a kört, de nem szelik át egymást.
- III.6.D** Az egy egyenes (húr) és (hozzá tartozó) körív által közrefogott alakzat a körszelet.
- III.8.D** Ha a körszelethez tartozó íven választunk egy pontot, és belőle a körszelet alapegyenesének végpontjaiba egyeneseket húzunk, akkor a meghúzott egyenesek által közrefogott szög körszeletbeli szög.
- III.11.D** Körszeletek hasonlóak, ha egyenlő szögeket fogadnak be, vagy (más kifejezéssel) ha a bennük levő szögek (D8) egyenlők egymással

A III. Könyv (elemi geometria). Tételek.

- III.2.** Ha egy körön választunk két tetszőleges pontot, akkor a pontokra illeszkedő szakasz a körön belül halad.
- III.9.** Ha egy körön belül választunk egy pontot, s e pontból a körhöz több mint két egyenlő szakasz vezet, akkor a választott pont a kör középpontja.
- III.14.** Egy körben az egyenlő húrok egyenlő távol vannak a középponttól, és a középponttól egyenlő távol levő húrok egyenlők egymással.
- III.20.** Egy körben a középponti szög kétakkora, mint a kerületi, ha e szögek ugyanazon íven nyugszanak.

Az V. Könyv (Eudoxos). Definíciók.

- V.1.D** Egy kisebb mennyiség egy nagyobb része, ha osztja a nagyobbat. [Azaz maradék nélkül megvan benne, tehát egész számú többszöröse.]
- V.3.D** Az *arány* két egynemű [egyenlő dimenziójú] mennyiség nagyságbeli viszonya.
- V.4.D** Mennyiségek egymáshoz viszonyított arányáról akkor beszélünk, ha az egyik többszöröse meghaladja a másikat.
- **Megjegyzés.** Euklidesz — ellentétben Archimédésszel — nem mondja ki követelményként, hogy egynemű mennyiségek kielégítik ezt a föltételt, de többnyire hallgatólagosan, a X.1.-ben ki is mondva, él ezzel. Lásd a tétel utáni megjegyzést.

Az V. Könyv (Eudoxos: Mennyiségek elmélete).

Definíciók (csak mai terminológiával).

- V.5.D** Legyenek a, b, c, d mennyiségek. Ezekre fönáll, hogy

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

- Ha a, c -t tetszőleges egész számmal, mondjuk m -mel, míg b, d -t tetszőleges egész számmal, mondjuk n -nel megszorozzuk, akkor m, n bármely választásánál
-

$$\begin{aligned} ma < nb &\Rightarrow mc < nd, \\ ma = nb &\Rightarrow mc = nd, \\ ma > nb &\Rightarrow mc > nd. \end{aligned}$$

Az V. Könyv (Eudoxos: Mennyiségek elmélete). Tételek (csak mai terminológiával).

Legyenek $a, b, \dots$ tetszőleges mennyiségek, m, n (pozitív egész) számok.

V.1. $ma + mb + mc + \dots = m(a + b + c + \dots)$

V.4. Ha $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$, akkor

$$\frac{ma}{nb} = \frac{mc}{nd}.$$

V.12. Ha $\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{e}{f}$, akkor

$$\frac{a}{b} = \frac{a + c + e}{b + d + f}.$$

V.17-18. Ha $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$, akkor

$$\frac{a \mp b}{b} = \frac{c \mp d}{d}.$$

A VI. Könyv (alakzatok hasonlósága). Definíciók.

VI.1.D Sokszögek hasonlóak, ha a szögeik egyenként megegyeznek és az egyenlő szögek melletti oldalak arányosak.

VI.3.D Azt mondjuk egy szakaszcsoportról, hogy folytonos arányban van fölcsúszva, ha a nagyobb csoport úgy aránylik a kisebbhez, mint a teljes szakasz a nagyobb csoportéhoz.

VI.4.D Egy alakzat magassága a csúcsáról az alapjára bocsátott merőleges.

Tételek.

VI.1 Az ugyanazon magasságú háromszögek és paralelogrammák úgy aránylanak egymáshoz, mint alapjaik.

A VI. Könyv (alakzatok hasonlósága). Tételek.

VI.4. Háromszögeknek, melyek szögei egymással egyenlők, arányosak az egyenlő szögek melletti oldalai, mégpedig az egyenlő szögekkel szemközti oldalak felelnek meg egymásnak.

VI.6. Ha két háromszögnek egy-egy szöge egyenlő és az egyenlő szögek melletti oldalak arányosak, egyenlők a háromszögek szögei, mégpedig a megfelelő oldalakkal szemközti szögek egyenlők.

VI.8. Ha egy derékszögű háromszögben a derékszög csúcsából az alapra egy merőleget bocsátunk, a merőleges melletti háromszögek mind a teljes háromszöghöz, mind egymáshoz hasonlóak.

VI.10. Osszuk föl fölcsúszatlan szakaszt adott fölcsúszott szakaszhoz hasonlóan. (**A párhuzamos szelők tétele.**)

A VI. Könyv (alakzatok hasonlósága). Tételek.

VI.21. Ugyanazon sokszöghöz hasonló alakzatok egymáshoz is hasonlóak.

VI.25. Szerkesztünk adott sokszöghöz hasonló és egyúttal egy másik adott sokszöggel egyenlő területű alakzatot.

A VII. Könyv (az első aritmetikai). Definíciók.

- VII.1.D** Az *egység* az, ami szerint minden létezőt egynek mondunk.
- VII.2.D** A *szám* az egységekből összetevődő sokaság.
- VII.3.D** Egy kisebb szám egy nagyobbnak *hányada* (része), ha osztja a nagyobbat.
- VII.12.D** *Prímszám*, amelyik csak az egységgel osztható. (A8)
- VII.13.D** Számok egymáshoz *relatív príme*k, ha csak az egység közös osztójuk.
- VII.14.D** *Összetett* az a szám, amelyiket valamely szám oszt.
- VII.17.D** A két szám összeszorzásakor keletkező számot *síkszámnak* nevezzük, az összeszorzott számokat pedig az oldalaknak.
- VII.23.D** Egy szám *tökéletes*, ha egyenlő osztói (részei) összegével

A VII. Könyv (az első aritmetikai). Tételek.

- VII.1.** Ha van két nem egyenlő számunk, a kisebbet váltakozva mindig kivonjuk a nagyobból, és a maradék sohasem osztja a megelőző számot, míg csak nem az egység a maradék, akkor az eredeti számok relatív prímek.
- VII.2.** Keressük meg két adott nem relatív prím szám legnagyobb közös osztóját.
- VII.16.** A két szám összeszorzásakor keletkező számok egyenlők egymással [függetlenül a sorrendtől].
- VII.30.** Ha két számot megszorzunk egymással, és a szorzatukat osztja valamely prímszám, akkor a tényezők egyikét is osztja.
- VII.31.** Bármely szám prím, vagy osztja egy prímszám.
- VII.36.** Keressük meg három adott szám legkisebb közös többszörösét.

A VIII. Könyv (a második aritmetikai: sorozatok). Tételek.

- VIII.1.** Ha egy tetszőleges sok tagú mértani sorozat szélső tagjai relatív prímek, akkor a sorozat tagjai legkisebbek azon számok között, amelyeknek ugyanaz az aránya, mint nekik.
- VIII.6.** Ha egy tetszőleges sok tagú mértani sorozat első tagja nem osztja a másodikat, akkor egyetlen tag sem oszt semmilyen másikat.
- VIII.14.** Ha egy négyzetszám oszt egy másikat, akkor az oldala is osztja a másiknak az oldalát; s ha az egyiknek az oldala osztja a másiknak az oldalát, akkor az egyik négyzetszám is osztja a másik négyzetszámot.
- VIII.22.** Ha egy háromtagú mértani sorozat első tagja négyzetszám, akkor a harmadik is négyzetszám.

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet). Tételek.

- IX.2.** Ha két szám összeszorzásakor négyzetszám keletkezik, akkor a számok hasonló síkszámok.
- IX.11.** Ha az egységgel kezdődően valahány szám mértani sorozatot alkot, akkor egy kisebb tag egy nagyobbban valamely, a sorozatban előforduló szám szerint van meg.
- IX.14.** Prímszámok legkisebb közös többszörösét egyetlen más prímszám sem osztja, csak amelyek eredetileg is osztják.

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet).
Tételek.

IX.20. *Prímszámok bármely adott sokaságánál van több.*

Bizonyítás. (az eredeti) Legyenek az adott prímszámok a, b és c . Azt állítom, hogy több prímszám van, mint a, b és c .

- ▶ Vegyük ugyanis a, b és c legkisebb közös többszörösét, ami — a VII. 36. Tétel szerint — abc és tekintsük az $d = abc + 1 = e + 1$ számot.
- ▶ Ez vagy prímszám, vagy összetett szám.
- ▶ Legyen először prím. Találtunk tehát az a, b, c számoknál több prímet, ezeket és még d -t.

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet). A
bizonyítás folytatása.

- ▶ Ne legyen most d prím. Ekkor osztja valamely prímszám (VII. 31. Tétel). Ossza a g prím.
- ▶ Azt állítom, hogy g az a, b és c egyikével sem azonos.
- ▶ Tegyük föl ugyanis, hogy az a, b és c osztják e -t, tehát g is osztja e -t (ugyanis a, b és c az összes prím).
- ▶ Viszont g d -t is osztja, tehát a maradék egységet is osztja g , ami ellentmondás, hiszen g szám.
- ▶ g tehát nem azonos az a, b, c számok egyikével sem.
- ▶ A feltétel szerint prím, tehát találtunk az adott a, b, c prímeknél több prímet, a -t, b -t, c -t és g -t. Éppen ezt kellett megmutatni.

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet). A
bizonyítás folytatása.

1. Megjegyzés. Az oszthatóság egy elemi tulajdonságát használja, amelyet — két másikkal egyetemben — sohasem fogalmaz meg, de ismertnek tételez föl: ha $z = u + v$, $t|z$, $t|u$ akkor $t|v$.

2. Megjegyzés. Az iménti bizonyítás lényegében megegyezik azzal, amelyet az elemi számelméleti tanulmányainkban megismertünk, csak ott a föltételben szereplő „összes” prímszám a $p_1, p_2, \dots, p_k$. Euklidesz bizonyítása lényegében csak azt használja ki, hogy abból a föltételből, hogy csak véges sok prímszám létezik, szükségképp ellentmondásra jutunk. Tehát tulajdonképpen azt igazolja, hogy végtelen sok prímszám van, de ezt így nem fogalmazza meg, hiszen az ő világa véges. (Arisztotelesz kétféle végtelene.)

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet).

A Párosról és a Páratlanról szóló tanítás.

IX.21. Bárhány páros számot adunk össze, az összeg páros.

IX.23. Ha összeadunk valahány páratlan számot, amelyek páratlan sokan vannak, akkor az összeg is páratlan lesz.

IX.25. Ha egy páros számból páratlant vonunk ki, a maradék páratlan.

IX.30. Ha egy páratlan szám oszt egy párosat, akkor a felét is osztja.

IX.31. Ha egy páratlan szám relatív prím valamely számhoz, akkor a kétszereséhez is relatív prím.

IX.33. Ha egy szám fele páratlan, akkor a szám csak párosszor páratlan alakban áll elő.

A IX.33. Tétel bizonyítása.

- ▶ Legyen az a szám fele páratlan.
- ▶ Ha a előáll párosszor páratlan alakban, akkor a fele, amely páratlan, párosszor van meg benne.
- ▶ Állítom, hogy csak ilyen alakban áll elő.
- ▶ Ha ugyanis a előállna párosszor páros alakban, akkor egy páros szám páros számszor lenne meg benne, úgyhogy a felét is osztaná egy páros szám, noha az páratlan, ami ellentmondás,
- ▶ a tehát csak párosszor páratlan alakban áll elő.
- ▶ Éppen ezt kellett megmutatni.

A IX. Könyv (a harmadik aritmetikai: számelmélet).

A könyv utolsó tétele.
IX.36. *Ha az egységtől indulva kétszeres arányban mértani sorozatot alkotunk addig, amíg az összeg prímszám nem lesz, és ezt megszorozzuk az utolsó taggal, akkor tökéletes számot kapunk.*

Mai terminológiával, szimbolikával

A

$$(1 + 2 + 4 + \dots + 2^{k-1})2^{k-1}$$

szám tökéletes, ha az első tényező, azaz

$$1 + 2 + 4 + \dots + 2^{k-1}$$

prímszám.

A X. Könyv (az irracionálisok ókori elmélete).

X.1.D Mennyiségeket összemérhetőeknek mondunk, ha ugyanazon mértékkel mérhetők, összemérhetetleneknek pedig, ha nem található hozzájuk közös mérték.
X.4.D És nevezzük az adott szakasz négyzetét racionálisnak, és az azzal összemérhető felületeket racionálisnak, az azzal összemérhetetleneket pedig irracionálisoknak, az őket előállító szakaszokat — ti. ha a felületek négyzetek, magukat az oldalakat, ha pedig valamely más sokszögek, a velük egyenlő négyzeteket fölrajzoló szakaszokat — irracionálisoknak.
X.1. Tétel. Ha adva van két nem egyenlő mennyiség és a nagyobbikból levonunk a felénél többet, és a maradékból ismét a felénél többet, és így tovább, akkor egy olyan mennyiség fog megmaradni, amely kisebb az adott mennyiségek kisebbikénél.

A X.1. Tétel bizonyítása 1.

- ▶ Legyen a két nem egyenlő mennyiség a, c és $a > c$.
- ▶ Az V.4. Definíció — mennyiségek egymáshoz viszonyított arányáról akkor beszélünk, ha az egyik többszöröse meghaladja a másikat — értelmében c -nek van olyan többszöröse, amely meghaladja a -t. Legyen ez $dc > a$.
- ▶ **Megjegyzés.** Euklidesz eredeti bizonyításában $d = 4$, amit úgy használ, hogy az nem szorítja meg az általánosságot, de csak 3 lépést tesz.
- ▶ Adjuk meg a következő $e_1, \dots, e_{d-1}$ mennyiségeket:
- ▶

$$e_1 > \frac{a}{2}, \quad e_2 > \frac{a - e_1}{2}, \quad e_3 > \frac{a - (e_1 + e_2)}{2}, \dots, \\ e_{d-1} > \frac{a - (e_1 + \dots + e_{d-2})}{2}$$

A X.1. Tétel bizonyítása 2.

- ▶ Az a mennyiségből ezután levonjuk e_1 -et, majd az $a - e_1$ mennyiségből az e_2 -t, az $a - (e_1 + e_2)$ -ből az e_3 -at és így tovább, összesen $d - 1$ számú lépést teszünk.
- ▶ Látható: az $e_1, \dots, e_{d-1}$ mennyiségeket úgy határozzuk meg, hogy a levonások mindig elvégezhetők legyenek, azaz pozitív mennyiség maradjon minden egyes lépés után.
- ▶ Tekintsük most a dc mennyiségeket, és abból is vonjunk le $d - 1$ számú lépésben mindig c -t. Ez esetben mindig az adott (kapott) mennyiség felénél kevesebbet vonunk le.
- ▶ Hasonlítsuk most össze a két eljárásunkat.

A X.1. Tétel bizonyítása 3.

- ▶ Mivel $dc > a$,
- ▶

$$\begin{aligned}dc - c &= (d - 1)c > a - e_1 \\(d - 1)c - c &= d - 2c > a - (e_1 + e_2) \\&\vdots \\(d - (d - 2))c - c &= c > a - (e_1 + \dots + e_{d-1}).\end{aligned}$$

- ▶ Az utolsó egyenlőtlenség éppen a bizonyítandó, hiszen
- ▶

$$\begin{aligned}(d - (d - 2))c - c &= c > a - (e_1 + \dots + e_{d-1}) = \\&(\dots((a - e_1) - e_2) - \dots - e_{d-2}) - e_{d-1}.\end{aligned}$$

A X.1. Tétel bizonyítása 4.

Megjegyzések.

1. Euklidesznél a fenti bizonyításban $d = 4$, de gondolatmenete megegyezik az általunk leírt általános esetről alkalmazottal.
2. Euklidesz megjegyzi: „hasonló a bizonyítás, ha a fele részeket vonjuk le”.
Vegyük észre: Euklidesz azt használta — hivatkozva az V. könyv 4. definíciójára —, hogy
... ha két nem egyenlő mennyiség közül a kisebbiket véges számú lépésben önmagához adjuk, akkor a nagyobbiknál nagyobb mennyiséget kapunk.
DE az idézett definíció erre nem jogosít, az csak arányuk létezéséről szól.

A X.1. Tétel bizonyítása 5.

Archimedesz megjegyzése.
Archimédész rámutatott, hogy ezt posztulálni kellett volna, amit Eudoxos meg is tett. Archimédész ugyancsak posztulátumként használta, azóta nevezik Archimédész - Eudoxos axiómának.

A X.1. Tétel bizonyítása 6. Kommentárok.

1. A kutatások szerint a X. könyv legnagyobb része Eudoxostól és Theaitetosztól ered, így lehet, hogy Euklidesz „egyszerűbbre való törekvésével” találkozunk itt.
A. DE MORGAN rövid summázata: „Euklidesz e könyvben összegzi az összes olyan szakaszra vonatkozó ismeretet, amelyek (modern terminológiával) megadhatók, mint

$$\sqrt{\sqrt{a} \pm \sqrt{b}},$$

ahol a, b összemérhető szakaszok.”

2. Világos, hogy nem az összes irracionális reprezentálható ílmódon, Euklidesz e részben a geometriai algebrájával (a II. könyv tartalma) kezelhető esetekre szorítkozott.

A X. Könyv befejezése.

Egy régen várt tétel.

A 115. Tétel (az utolsó) után következik a **X.27.** Függelék. *Mutassuk meg, hogy a négyzetekben az átló lineárisan összemérhetetlen az oldallal.*

A XI. - XIII. Könyvek.

Egybefüggő anyag, definíciók is csak a XI. Könyvben vannak, együtt tárgyaljuk a három könyvet. Valamennyi térgeometriával foglalkozik, e mellett alakzatok területével és testek térfogatával kapcsolatos tételeket is tartalmaznak.

Definíciók 1.

- XI.1.D** Test az, aminek hosszúsága, szélessége és magassága is van.
- XI.2.D** A test vége felület.
- XI.4.D** Két sík merőleges egymásra, ha az egyik síkban a síkok közös részére bocsátott merőlegesek merőlegesek a másik síkra.

A XI. - XIII. Könyvek. Definíciók 2.

- XI.6.D** Két sík hajlata az a hegyesszög, amely a síkok közös részére ugyanazon a pontban az egyes síkokban állított merőlegesek fognak közre.
- XI.12.D** Gúla az a téridom, melyet egy síkból induló egy pontban találkozó síklapok fognak közre.
- XI.14.D** Ha egy félkört rögzített átmérője körül addig forgatunk, míg eredeti helyzetét újra el nem éri, a közrefogott idom gömb.
- XI.18.D** Ha egy derékszögű háromszöget egyik derékszög melletti oldalát rögzítve addig forgatunk, míg eredeti helyzetét újra el nem éri, a közrefogott idom kúp. Ha a rögzített oldal egyenlő a körbeforgatott másik derékszög melletti oldallal, akkor a kúp derékszögű, ha kisebb, akkor tompaszögű, ha pedig nagyobb, akkor hegyesszögű.

A XI. - XIII. Könyvek.

Definíciók 3.

- XI.24.D** Kúpok és hengerek hasonlóak, ha tengelyeik és alapjaik átmérőirányosak.
- XI.25.D** **Kocka** a hat egyenlő négyzet által közrefogott téridom.
- XI.26.D** **Oктаéдер** a nyolc egyenlő (területű), egyenlő oldalú háromszög által közrefogott téridom.
- XI.27.D** **Ikozaéдер** a húsz egyenlő oldalú háromszög által közrefogott téridom.
- XI.28.D** **Dodekaéдер** a tizenkettő egyenlő, egyenlő oldalú és szögű ötszög által közrefogott téridom.

A XI. - XII. Könyvek.

Általános megjegyzés.

Viszonylag kevésbé kidolgozott e két könyv, a poliéderekre vonatkozó tételeket olykor csak speciális esetekre igazolta.

Tételek.

- XI.1.-19.** Egyenesek és síkok közös helyzetével foglalkoznak.
- XI.24.** Ha egy síkidomot (hat páronként) párhuzamos lap fog közre, akkor a szemközti lapok egybevágók és paralelogrammák.
- XI.27.** Emeljünk adott szakaszra adott paralelepipedonhoz hasonló és hasonlóan fekvő paralelepipedont.
- XI.32.** Azon paralelepipedonok, amelyek magassága ugyanaz, úgy aránylanak egymáshoz, mint az alapjaik.

A XI. - XII. Könyvek.

Tételek.

XI.38. Ha egy kocka két szemközti lapjának oldalait megfelezzük és az osztáspontokon síkokat fektetünk át, akkor a síkok metszete és a kocka átlója felezik egymást.

A XII. Könyv.

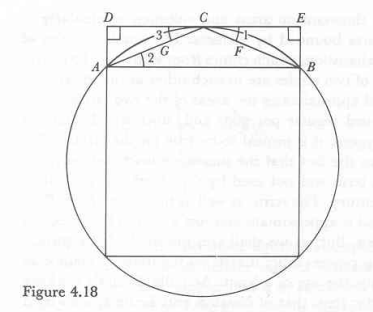
Terület - térfogat.

- XII.1.** Körbe írt hasonló sokszögek (területei) úgy aránylanak, mint a körök átmérőirányzetei.
- XII.2.** A körök (területei) úgy aránylanak egymáshoz, mint átmérőik négyzetei.

XII.2. Bizonyítása.

- ▶ Első lépésként azt igazolja: a kör „kimeríthető” sokszögekkel. A X.1. Tételt alkalmazza.
- ▶ Második lépés: Megmutatja, hogy két kör aránya nem lehet sem kisebb, sem nagyobb az átmérők négyzetei arányánál.
- ▶ Az eljárás illusztrációja a következő dián látható.

Az ábra.



A XII. Könyv.

További tételek.

- XII.5.** Azonos magasságú háromszög alapú gúlák úgy aránylanak, mint alapjaik.
- XII.10.** Minden kúp harmadrésze az egyenlő magasságú és ugyanazon alapú hengernek.
- XII.18.** Gömbök (térfogatai) aránya átmérőik háromszoros aránya.

A XIII. Könyv.

A két fő téma.

- ▶ A szabályos sokszögek tulajdonságai, az aranymetszés (tekinthető K. Ptolemaiosz hűrtáblázatai előfutárának, előkészítőjének).
- ▶ Hogyan írhatjuk be adott gömbbe **AZ 5 szabályos testet**? (Hasonlítható a IV. Könyv körbe írt sokszögekre vonatkozó tételeihez.)

A XIII. Könyv.

Fontos!

- ▶ E könyv tekinthető — különösen a második része — úgy is, mint az egész mű (ti. az Elemek) fő célja, minden ennek érdekében történt.
- ▶ Ugyanis azt is igazolja, hogy **a tekintett öt szabályos test az összes lehetséges ilyen test.**
- ▶ Vélhetően nagyrészt Theaitetosz eredményeit tartalmazza a XIII. Könyv.