

A. KISSELJOV



# GEO- MEETRIA

STEREOMETRIA

**XI**

KLASSILE

52965





A-24157

A. KISSELJOV

# GEOMEETRIA

## STEREOMEETRIA

### KESKKOOLI XI KLASSILE

Prof. N. Glagolevi toimetusel ja lisaga

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1962

Originaali tiitel: А. П. Киселёв. Геометрия. Часть вторая. Стереометрия. Учебник для 9—10 классов средней школы.  
Утверждён Министерством просвещения РСФСР.  
Учпедгиз 1960.

Tõlkinud A. Vihman.  
Kaane kujundanud S. Liiberg.

Tõlge kinnitatud Eesti NSV Haridusministeeriumi poolt.

ARHIIVKOGU

2



# STEREOMEETRIA.

## EELMÄRKUSI.

1. Stereomeetrias käsitletakse geomeetrilisi kehasid ja ruumilisi kujundeid, mille kõik punktid ei asetse ühel tasapinnal. Ruumilisi kujundeid kujutatakse joonisel nii, et nad kutsuvad silmas esile umbes samasuguse mulje nagu kujundid ise. Need joonised valmistatakse kindlate reeglite järgi, mis põhinevad kujundite geomeetrilistel omadustel.

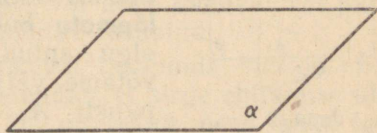
Ühte ruumiliste kujundite kujutamise võtet tasapinnal käsitleme edaspidi (§§ 54—66).

Esimene peatükk.

## SIRGED JA TASAPINNAD.

### I. TASAPINNA ASENDI MÄÄRAMINE.

2. **Tasapinna kujutamine.** Paljudel igapäevases elus tarvitatavatel esemetel, mille pind meenutab tasapinda, on ristküliku kuju, näiteks: raamatu kõide, aknaklaas, kirjutuslaua plaat jne. Seejuures, vaadeldes neid esemeid kõrvalt ja suu-  
rest kaugusest, näib neil olevat rööpküliku kuju. Seepärast on saanud kombeks kujutada tasapinda joonisel rööpkülikuna. Tasapinda tähistatakse tavaliselt ühe kreeka tähega, näiteks «tasapind  $\alpha$ » (joon. 1).



Joon. 1.

3. **Tasapinna põhiomadused.** Mainime järgmisi tasapinna omadusi, mida tunnustatakse tõestuseta, s. t. kasutatakse aksioomidena.

1) Kui sirgjoone kaks punkti asetsevad mingil tasapinnal, siis asetsevad sellel tasapinnal ka selle sirge kõik teised punktid.

2) Kui kahel tasapinnal on üks ühine punkt, siis need tasapinnad lõikuvad mööda sirget, mis läbib seda punkti.

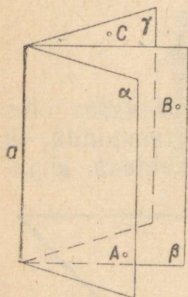
3) Läbi kolme punkti, mis ei asetse ühel sirgel, saab panna tasapinna ja ainult ühe.

4. Järeldused. Viimasest lausest saab teha järgmised järeldused:

1) Läbi sirge ja sellest väljaspool asetseva punkti saab panna tasapinna (ja ainult ühe). Tõepoolest, väljaspool sirget asetsev punkt koos mingi kahe punktiga, mis on võetud sellel sirgel, moodustavad kolm niisugust punkti, milledest läbi saab panna tasapinna (ja ainult ühe).

2) Läbi kahe lõikuva sirge saab panna tasapinna (ja ainult ühe). Tõepoolest, võttes sirgete lõikepunkti ja veel ühe punkti kummalgi sirgel, saame kolm niisugust punkti, milledest läbi saab panna tasapinna (ja ainult ühe).

3) Läbi kahe paralleelse sirge saab panna ainult ühe tasapinna. Tõepoolest, paralleelsete sirgete definitsiooni järgi kaks paralleelset sirget asetsevad ühel ja samal tasapinnal; seejuures on neid tasapindu ainult üks, sest läbi ühe sirge ja läbi punkti, mis on võetud teisel sirgel, saab panna ainult ühe tasapinna.



Joon. 2.

5. Tasapinna pöörlemine ümber sirge.

**Ruumis saab läbi iga sirge asetada lõpmatu hulga tasapindu.**

Tõepoolest, olgu antud mingi sirge  $a$  (joon. 2); võtame väljaspool seda sirget mingi punkti  $A$ . Punkti  $A$  ja sirget  $a$  läbib ainult üks tasapind (§ 4). Nimetame seda tasapinnaks  $\alpha$ . Võtame uue punkti

$B$  väljaspool tasapinda  $\alpha$ . Punkti  $B$  ja sirget  $a$  läbib uus tasapind. Nimetame seda tasapinnaks  $\beta$ . See tasapind ei saa ühtida tasapinnaga  $\alpha$ , sest temal asetseb punkt  $B$ , mis ei kuulu tasapinnale  $\alpha$ . Meie võime võtta ruumis väljaspool tasapinda  $\alpha$  ja  $\beta$  jälle uue punkti  $C$ . Punkti  $C$  ja sirget  $a$  läbib jällegi uus tasapind. Nimetame seda tasapinnaks  $\gamma$ . Ta ei saa ühtida ei tasapinnaga  $\alpha$  ega ka tasapinnaga  $\beta$ , sest temal asetseb punkt  $C$ , mis ei kuulu tasapinnale  $\alpha$  ega ka tasapinnale  $\beta$ . Jätkates järjest uute

punktide võtmist ruumis, saame järjest uusi tasapindu, mis läbivad sirget  $a$ . Niisuguste tasapindade hulk on lõpmatu. Kõiki neid tasapindu võime aga käsitleda ka kui ühe ja sama tasapinna eri asendeid selle tasapinna pöörlemisel ümber sirge  $a$ .

Järelikult võime väljendada veel ühe tasapinna omaduse: tasapind võib pöörelda iga sellel tasapinnal asetseva sirge ümber.

**6. Konstruksioonülesannetest ruumis.** Kõiki konstruksioone, millega tegeldakse planimeetrias, on võimalik teostada ühelainsal tasapinnal, kasutades selleks joonestamisvahendeid. Ruumilisteks konstruksioonideks aga joonestamisvahendeid ei saa kasutada, sest on võimatu joonestada kujundeid ruumis. Peale selle esineb ruumilistes konstruksioonides uus element — tasapind, mille ehitamist ei saa teostada samasuguste lihtsate vahenditega nagu sirgjoone ehitamist tasapinnal.

Seepärast on tarvis täpselt kindlaks määrata, mida mõista nõude all teostada üks või teine ruumiline konstruksioon, eriti aga, mida mõista nõude all ehitada tasapind ruumis. Kõigi ruumiliste konstruksioonülesannete kohta eeldame järgmist:

1) et konstrueerida tasapind, tuleb leida tema asendit ruumis määravad elemendid (§ 3 ja § 4), see tähendab, et tasapinna ehitamise ülesande loeme lahendatuks, kui on leitud kolm mitte ühel sirgel asetsevat punkti, või sirge ja punkt väljaspool seda sirget, või kaks lõikuvat või paralleelset sirget, mida läbib otsitav tasapind;

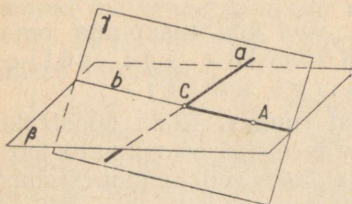
2) kui on antud kaks lõikuvat tasapinda, siis on antud ka nende lõikesirge, see tähendab, et sirge ehitamise ülesande loeme lahendatuks, kui on leitud need kaks tasapinda, mille lõikejooneks on otsitav sirge;

3) kui ruumis on antud tasapind, siis sellel tasapinnal on teostatavad kõik need tasapinnalised konstruksioonid, mis on teostatavad planimeetrias.

Teostada mingi ruumiline konstruksioon tähendab taandada see ülesanne lõplikuks arvuks mainitud põhikonstruksioonideks.

Nende eelduste ja kokkulepete põhjal lahendataksegi stereomeetrilisi konstruksioonülesandeid.

7. Ruumilise konstruksioonülesande näide. Ülesanne. Leida antud sirge  $a$  (joon. 3) ja antud tasapinna  $\beta$  lõikepunkt. Võtame tasapinnal  $\beta$  mingi punkti  $A$ . Läbi punkti  $A$  ja sirge  $a$  paigutame tasapinna  $\gamma$ . See tasapind lõikab tasapinda  $\beta$  mööda mingit sirget  $b$ . Leiame tasapinnal  $\gamma$  sirgete  $a$  ja  $b$  lõikepunkti. See punkt ongi otsitav punkt. Kui sirged  $a$  ja  $b$  osutuvad paralleelseteks, siis ülesandel lahendit ei ole.

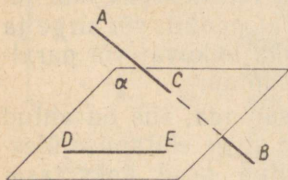


Joon. 3.

## II. PARALLEELSESED SIRGED JA TASAPINNAD.

### Paralleelsed sirged.

8. Eelmärkus. Kaks sirget võivad ruumis asetseda nii, et läbi nende ei saa panna tasapinda. Võtame näiteks (joon. 4) kaks niisugust sirget  $AB$  ja  $DE$ , millest üks lõikab mingit tasapinda  $\alpha$ , teine aga asetseb sellel tasapinnal,



Joon. 4.

kuid ei läbi esimese sirge ja tasapinna  $\alpha$  lõikepunkti ( $C$ ). Läbi kahe niisuguse sirge ei ole võimalik panna tasapinda, sest vastasel korral läbiks sirget  $DE$  ja punkti  $C$  kaks eri tasapinda: tasapind  $\alpha$ , mis lõikub sirgega  $AB$ , ja mingi teine tasapind, millel asetseb sirge  $AB$ , — kuid see on võimatu (§ 3).

Kaks sirget, mis ei asetse ühel tasapinnal, ei saa muidugi lõikuda; siiski neid ei nimetata paralleelseteks, sest see nimetus säilitatakse sirgetele, mis teineteisega ei lõiku, kuid asetsevad seejuures ühel ja samal tasapinnal.

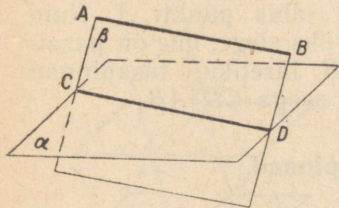
Kaht sirget, mis ei asetse ühel tasapinnal, nimetatakse kiivsirgeteks.

## Sirge ja tasapinna paralleelsus.

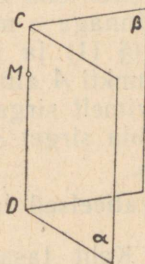
**9. Definiitsioon.** Tasapinda ja väljaspool seda tasapinda asetsevat sirget nimetatakse *paralleelseteks*, kui nad teineteisega ei lõiku, ükskõik kui palju neid ka pikendada.

**10. Teoreem.** Kui sirge ( $AB$ , joon. 5) on *paralleelne mingi sirgega* ( $CD$ ), mis asetseb tasapinnal ( $\alpha$ ), siis on ta *paralleelne ka selle tasapinnaga*.

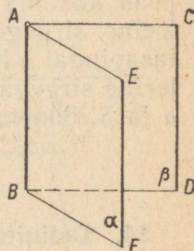
Läbi sirgete  $AB$  ja  $CD$  paneme tasapinna  $\beta$  ja oletame, et sirge  $AB$  lõikab kusagil tasapinda  $\alpha$ . Siis oletatav lõikepunkt, asetsedes sirgel  $AB$ , peab kuuluma ka tasapinnale  $\beta$ , millel asetseb sirge  $AB$ ; samal ajal lõikepunkt peab muidugi kuuluma ka tasapinnale  $\alpha$ . Tähendab, oletatav lõikepunkt, asetsedes samaaegselt nii tasapinnal  $\alpha$  kui ka tasapinnal  $\beta$ , peab asetsema nende lõikesirgel  $CD$ . Järelikult



Joon. 5.



Joon. 6.



Joon. 7.

sirge  $AB$  lõikub sirgega  $CD$ . Kuid see on võimatu, kuna eelduse järgi  $AB \parallel CD$ . Seega on võimatu, et sirge  $AB$  lõikaks tasapinda  $\alpha$ , ja seepärast  $AB \parallel \alpha$ .

**11. Teoreem.** Kui ühel tasapinnal ( $\beta$ , joon. 5) asetsev sirge ( $AB$ ) on *paralleelne teise tasapinnaga* ( $\alpha$ ) ja need tasapinnad lõikuvad, siis see sirge ( $AB$ ) on *paralleelne nende tasapindade lõikesirgega* ( $CD$ ).

Tõepoolest, esiteks, sirge  $CD$  asetseb sirgega  $AB$  ühel ja samal tasapinnal  $\beta$ ; teiseks, sirge  $CD$  ei saa lõikuda sirgega  $AB$ , sest vastasel korral sirge  $AB$  lõikaks tasapinnaga  $\alpha$ , mis on aga võimatu.

**12. Järeldus 1.** Kui sirge ( $AB$ , joon. 6) on *paralleelne kummagagi kahest lõikuvast tasapinnast* ( $\alpha$  ja  $\beta$ ), siis on ta *paralleelne ka nende tasapindade lõikesirgega* ( $CD$ ).

Paneme läbi sirge  $AB$  ja läbi sirge  $CD$  mingi punkti  $M$  tasapinna. See tasapind peab lõikuma tasapindadega  $\alpha$  ja  $\beta$  mööda sirgeid, mis on paralleelsed sirgega  $AB$  ja läbivad punkti  $M$ . Kuid punkti  $M$  läbib ainult üks sirge, mis on paralleelne sirgega  $AB$ ; see tähendab, et abitasapinna ning tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  kaks oletatavat lõikesirget peavad ühtima. See sirge, asetledes samaaegselt tasapinnal  $\alpha$  ja tasapinnal  $\beta$ , peab ühtima nende tasapindade lõikesirgega  $CD$ ; seega  $CD \parallel AB$ .

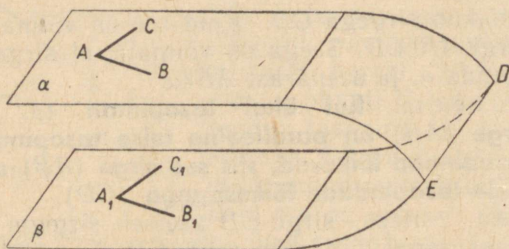
13. Järeldus 2. Kui kaks sirget ( $AB$  ja  $CD$ , joon. 7) on paralleelsed kolmanda sirgega ( $EF$ ), siis nad on paralleelsed ka teineteisega.

Paneme tasapinna  $\alpha$  läbi paralleelsete sirgete  $AB$  ja  $EF$ . Et  $CD \parallel EF$ , siis  $CD \parallel \alpha$  (§ 10).

Paneme läbi sirge  $CD$  ja läbi sirge  $AB$  mingi punkti  $A$  tasapinna  $\beta$ . Et  $EF \parallel CD$ , siis  $EF \parallel \beta$ . Järelikult tasapind  $\beta$  peab lõikuma tasapinnaga  $\alpha$  mööda sirget, mis on paralleelne sirgega  $EF$  (§ 11) ja mis läbib punkti  $A$ . Kuid tasapinnal  $\alpha$  läbib punkti  $A$  ainult üks sirge, mis on paralleelne sirgega  $EF$ , nimelt sirge  $AB$ . Järelikult tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikuvad mööda sirget  $AB$ , seega  $CD \parallel AB$ .

### Paralleelsed tasapinnad.

14. **Definitsioon.** Kaht tasapinda, mis ei lõiku teineteisega, ükskõik kui palju neid ka pikendada, nimetatakse paralleelseteks.



Joon. 8.

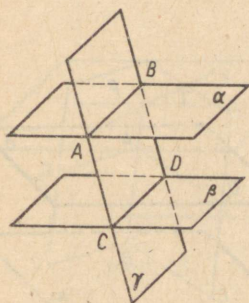
15. **Teoreem.** Kui ühe tasapinna ( $\alpha$ , joon. 8) kaks lõikuvat sirget ( $AB$  ja  $AC$ ) on vastavalt paralleelsed teise tasapinna ( $\beta$ ) kahe lõikuva sirgega ( $A_1B_1$  ja  $A_1C_1$ ), siis need tasapinnad on paralleelsed.

Sirged  $AB$  ja  $AC$  on paralleelsed tasapinnaga  $\beta$  (§ 10). Oletame, et tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikuvad mööda mingit sirget  $DE$  (joon. 8). Niisugusel juhul  $AB \parallel DE$  ja  $AC \parallel DE$  (§ 11). Seega läbib punkti  $A$  tasapinnal  $\alpha$  kaks sirget  $AB$  ja  $AC$ , mis on paralleelsed sirgega  $DE$ , mis on aga võimatu. Järelikult tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  ei lõiku.

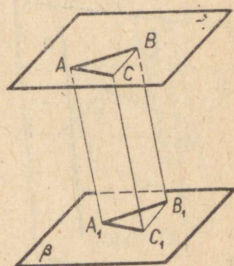
**16. Teoreem. Kui kahte paralleelset tasapinda ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 9) lõigata kolmanda tasapinnaga ( $\gamma$ ), siis lõikesirged ( $AB$  ja  $CD$ ) on paralleelsed.**

Tõepoolest, esiteks, sirged asetsevad ühel ja samal tasapinnal ( $\gamma$ ), teiseks, nad ei saa lõikuda, sest vastasel korral lõikuksid tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$ , mis on aga vastuolus eeldusega.

**17. Teoreem. Paralleelsete tasapindade ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 9) vahelised paralleelsete sirgete lõigud ( $AC$  ja  $BD$ ) on võrdsed.**



Joon. 9.



Joon. 10.

Paneme läbi paralleelsete sirgete  $AC$  ja  $BD$  tasapinna  $\gamma$ ; see tasapind lõikab tasapindu  $\alpha$  ja  $\beta$  mööda paralleelseid sirgeid  $AB$  ja  $CD$ . Järelikult nelinurk  $ABDC$  on rööpkülik ja seepärast  $AC = BD$ .

**18. Teoreem. Vastavalt paralleelsete ja samasuunaliste haaradega kaks nurka ( $BAC$  ja  $B_1A_1C_1$ , joon. 10) on võrdsed ja asetsevad paralleelsetel tasapindadel ( $\alpha$  ja  $\beta$ ).**

Et tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  on paralleelsed, oli juba eespool tõestatud (§ 15); jääb tõestada, et nurgad  $A$  ja  $A_1$  on võrdsed.

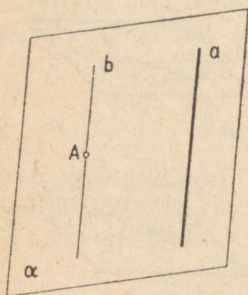
Võtame nurkade haaradel vabalt valitud, kuid vastavalt

võrdsed lõigud  $AB=A_1B_1$  ja  $AC=A_1C_1$  ning tõmbame sirglõigud  $AA_1$ ,  $BB_1$ ,  $CC_1$ ,  $BC$  ja  $B_1C_1$ . Et lõigud  $AB$  ja  $A_1B_1$  on võrdsed ja paralleelsed, siis nelinurk  $ABB_1A_1$  on rööpkülik; seetõttu on paralleelsed ja võrdsed ka lõigud  $AA_1$  ja  $BB_1$ . Samal põhjusel on võrdsed ja paralleelsed ka lõigud  $AA_1$  ja  $CC_1$ ; järelikult  $BB_1\parallel CC_1$  ja  $BB_1=CC_1$ . Seepärast  $BC=B_1C_1$  ja  $\triangle ABC=\triangle A_1B_1C_1$  (kolme külje järgi); järelikult  $\angle A=\angle A_1$ .

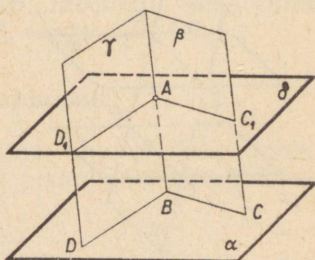
### Konstruksioonülesandeid.

19. Ehitada ruumis läbi väljaspool antud sirget ( $a$ , joon. 11) asetseva punkti ( $A$ ) sirge, mis oleks paralleelne antud sirgega ( $a$ ).

Lahendus. Paneme läbi sirge  $a$  ja punkti  $A$  tasapinna  $\alpha$ . Sellel tasapinnal tõmbame läbi punkti  $A$  sirge  $b$  paralleelselt sirgega  $a$ .



Joon. 11.



Joon. 12.

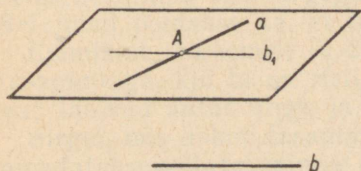
Ülesandel on ainult üks lahend. Tõepoolest, otsitav sirge peab asetsema sirgega  $a$  ühel ja samal tasapinnal. Samal tasapinnal peab asetsema ka punkt  $A$ , mida peab läbima otsitav sirge. Täheleb, see tasapind peab ühtima tasapinnaga  $\alpha$ . Kuid läbi punkti  $A$  tasapinnal  $\alpha$  saab tõmmata ainult ühe sirge, mis on paralleelne sirgega  $a$ .

20. Läbi antud punkti ( $A$ , joon. 12) ehitada tasapind, mis oleks paralleelne antud tasapinnaga ( $\alpha$ ), mis ei läbi antud punkti ( $A$ ).

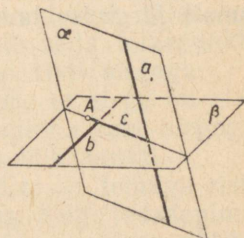
Lahendus. Tõmbame läbi mingi punkti  $B$  tasapinnal  $\alpha$  mingid kaks sirget  $BC$  ja  $BD$ . Kujundame kaks abi-

tasapinda: läbi punkti  $A$  ja sirge  $BC$  — tasapinna  $\beta$  ning läbi punkti  $A$  ja sirge  $BD$  — tasapinna  $\gamma$ . Otsitav, tasapinnaga  $\alpha$  paralleelne tasapind peab lõikama tasapinda  $\beta$  mööda sirget, mis on paralleelne sirgega  $BC$ , ja tasapinda  $\gamma$  mööda sirget, mis on paralleelne sirgega  $BD$  (§ 16). Sellest järeldub niisugune konstruktsioon: tõmbame läbi punkti  $A$  tasapinnal  $\beta$  sirge  $AC_1 \parallel BC$  ja tasapinnal  $\gamma$  sirge  $AD_1 \parallel BD$ . Läbi sirgete  $AC_1$  ja  $AD_1$  paneme tasapinna  $\delta$ . See tasapind ongi nõutav tasapind. Tõepoolest, tasapinnal  $\delta$  asetseva nurga  $D_1AC_1$  haarad on paralleelsed tasapinnal  $\alpha$  asetseva nurga  $DBC$  haaradega. Järelikult  $\delta \parallel \alpha$ .

Et tasapinnal  $\beta$  on läbi punkti  $A$  võimalik tõmmata ainult üks sirgega  $BC$  paralleelne sirge, siis ülesandel on ainult üks lahend. Järelikult on läbi väljaspool tasapinda asetseva punkti võimalik panna ainult üks antud tasapinnaga paralleelne tasapind.



Joon. 13.



Joon. 14.

**21. Läbi antud sirge ( $a$ , joon. 13) ehitada teise antud sirgega ( $b$ ) paralleelne tasapind.**

Lahendus. 1. juhtum: sirged  $a$  ja  $b$  ei ole paralleelsed. Läbi sirge  $a$  mingi punkti  $A$  ehitame sirgega  $b$  paralleelse sirge  $b_1$ ; läbi sirgete  $a$  ja  $b_1$  paneme tasapinna. See tasapind ongi nõutav tasapind (§ 10). Ülesandel on sel juhul ainult üks lahend.

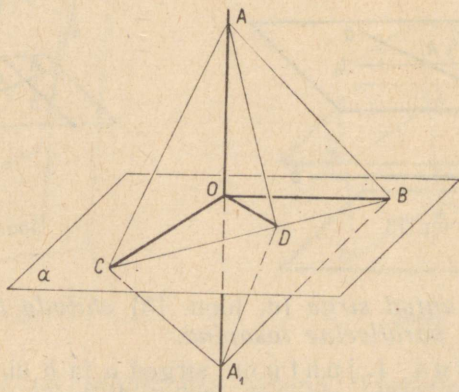
2. juhtum: sirged  $a$  ja  $b$  on paralleelsed. Sel juhul ülesanne on määramatu, sest iga tasapind, mis läbib sirget  $a$ , on paralleelne sirgega  $b$ .

**22. Keerulisema konstruktsioonülesande näide.** On antud kaks kiivsirget ( $a$  ja  $b$ , joon. 14) ja punkt  $A$ , mis ei asetse kummalgi nendest sirgetest. Ehitada läbi punkti  $A$  sirge, mis lõikab mõlemat antud sirget.

Lahendus. Et antud sirge peab läbima punkti  $A$  ja lõikama sirget  $a$ , siis peab ta asetsema punkti  $A$  ja sirget  $a$  läbival tasapinnal (sest kaks tema punkti,  $A$  ja lõikepunkt sirgega  $a$ , asetsevad sellel tasapinnal). Just samuti veendume, et otsitav sirge peab asetsema tasapinnal, mis läbib punkti  $A$  ja sirget  $b$ . Järelikult, see sirge peab olema nende tasapindade lõikesirge. Siit järeldub järgmine konstruktsioon. Asetame läbi punkti  $A$  ja sirge  $a$  tasapinna  $\alpha$ ; läbi punkti  $A$  ja sirge  $b$  asetame tasapinna  $\beta$ . Võtame tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikesirge  $c$ . Kui sirge  $c$  ei ole paralleelne kummagagi antud sirgetest, siis ta lõikab mõlemat (sest ta asetseb kummagagi neist ühel tasapinnal:  $a$  ja  $c$  asetsevad tasapinnal  $\alpha$ ,  $b$  ja  $c$  — tasapinnal  $\beta$ ). Sel juhul sirge  $a$  ongi otsitav sirge. Kui aga  $a \parallel c$  või  $b \parallel c$ , siis ülesandel pole lahendit. Sirged  $a$  ja  $c$  on paralleelsed sel juhtumil, kui punkti  $A$  ja sirget  $b$  läbiv tasapind on paralleelne sirgega  $a$ . Analoogiliselt:  $b \parallel c$ , kui  $a \parallel b$ .

### III. TASAPINNA RIST- JA KALDSIRGED.

Seame endale ülesandeks määrata, missugusel juhul võib sirget lugeda ristuvaks tasapinnaga. Tõestame esmalt järgmise lause.



Joon. 15.

**23. Teoreem.** Kui tasapinnaga lõikuv sirge ( $AA_1$ , joon. 15) on risti selle tasapinna mingi kahe sirgega ( $OB$  ja  $OC$ ), mis läbivad antud sirge ja tasapinna lõikepunkti ( $O$ ), siis antud sirge on risti ka selle tasapinna iga kolmanda sirgega ( $OD$ ), mis läbib sedasama lõikepunkti ( $O$ ).

Võtame sirgel  $AA_1$  vabalt valitud pikkusega, kuid võrdsed lõigud  $OA$  ja  $OA_1$ , ja tõmbame tasapinnal mingi sirge,

mis lõikab punkti  $O$  läbivat kolme sirget mingites punktides  $C, D$  ja  $B$ . Uhendame need punktid punktidega  $A$  ja  $A_1$ . Siis saame rea kolmnurki. Vaatleme neid järgemööda.

Esmalt vaatleme kolmnurki  $ACB$  ja  $A_1CB$ ; need on kongruentsed, sest neil on ühine külge  $CB$ ,  $AC = A_1C$  kui kaldlõigud  $AA_1$  suhtes, millede aluspunktid on võrdsel kaugusel ristlõigu  $OC$  aluspunktist  $O$ ,  $AB = A_1B$  samal põhjusel. Nende kolmnurkade ühtivusest järeldub, et  $\angle ABC = \angle A_1BC$ .

Seejärel siirdume kolmnurkade  $ADB$  ja  $A_1DB$  vaatlemisele: need on kongruentsed, sest neil on ühine külge  $DB$ ,  $AB = A_1B$  ja  $\angle ABD = \angle A_1BD$ . Nende kolmnurkade ühtivusest järeldame, et  $AD = A_1D$ .

Nüüd võtame kolmnurgad  $AOD$  ja  $A_1OD$ ; need on kongruentsed, sest nende vastavad küljed on võrdsed. Nende kolmnurkade ühtivusest järeldame, et  $\angle AOD = \angle A_1OD$ ; et need nurgad on aga kõrvunurgad, siis  $AA_1 \perp OD$ .

**24. Definiitsioon.** Sirget nimetatakse tasapinna ristsirgeks, kui ta lõikudes tasapinnaga moodustab täisnurga selle tasapinna iga sirgega, mis läbib seda lõikepunkti. Sel juhul öeldakse ka, et tasapind on risti sirgega.

Eelmisest teoreemist (§ 23) järeldub, et sirge on risti tasapinnaga, kui ta on risti selle tasapinna kahe sirgega, mis läbivad antud sirge ja tasapinna lõikepunkti.

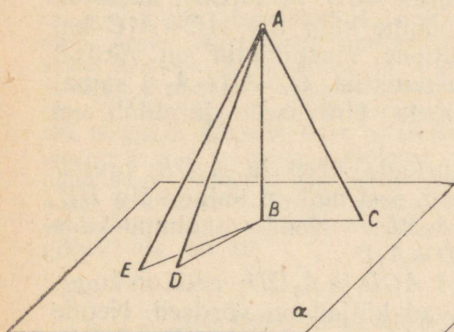
Sirget, mis lõikub tasapinnaga, kuid ei ole temaga risti, nimetatakse selle tasapinna **kaldsirgeks**. Sirge ja tasapinna lõikepunkti nimetatakse ristsirge või kaldsirge **aluspunktiks**.

**25. Ristlõigu ja kaldlõigu pikkuste võrdlemine.**<sup>1</sup> Kui ühest ja samast punktist  $A$  (joon. 16) on tasapinnale ehitatud ristlõik  $AB$  ja kaldlõik  $AC$ , siis kaldlõigu projektsiooniks tasapinnal  $a$  nimetame lõiku  $BC$ , mis ühendab ristlõigu ja kaldlõigu aluspunkte. Niiviisi lõik  $BC$  on kaldlõigu  $AC$  projektsioon, lõik  $BD$  on kaldlõigu  $AD$  projektsioon jne.

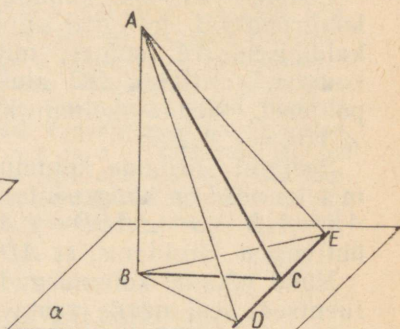
**26. Teoreem.** Kui ühest ja samast väljaspool tasapinda ( $a$ , joon. 16) asetsevast punktist ( $A$ ) on sellele tasapinnale ehitatud ristlõik ( $AB$ ) ja kaldlõigud ( $AC, AD, AE, \dots$ ), siis:

<sup>1</sup> «Tasapinnani ehitatud ristlõigu» ja «tasapinnani ehitatud kaldlõigu» all mõtleme ristsirge lõiku antud punktist kuni ristsirge aluspunktini ja kaldsirge lõiku antud punktist kuni kaldsirge aluspunktini.

- 1) võrdsete projektsioonidega kaldlõigud on võrdsed;
- 2) kahest kaldlõigust on suurem see, mille projektsioon on suurem.



Joon. 16.



Joon. 17.

Pöörates täisnurkseid kolmnurki  $ABC$  ja  $ABD$  kaateti  $AB$  ümber, võime nende tasapinnad viia ühtivusse kolmnurga  $ABE$  tasapinnaga. Siis ristlõik ja kõik kaldlõigud asetsevad ühes ja samas tasapinnas ning nende projektsioonid asetsevad ühel ja samal sirgel. Seega on tõestatav teoreem taandatud analoogilistele teoreemidele planimeetriast.

Märkus. Et ristlõik  $AB$  on täisnurkse kolmnurga kaatetik ja iga kaldlõik:  $AC, AD, AE, \dots$  on hüpotenuusiks, siis ristlõik on väiksem igast kaldlõigust, tähendab, punktist tasapinnale ehitatud ristlõik on lühim kõigist lõikudest, mis seda punkti ühendavad selle tasapinna mistahes punktidega, ja seepärast ristlõiku loetakse punkti  $A$  kauguseks tasapinnast  $\alpha$ .

**27. Pöördteoreemid.** Kui ühest ja samast väljaspool tasapinda asetsevast punktist on tasapinnale ehitatud ristlõik ja kaldlõigud, siis: 1) võrdsetel kaldlõikudel on võrdsed projektsioonid, 2) kahest projektsioonist on suurem see, mis vastab suuremale kaldlõigule.

Jätame õpilastele endile tõestada need teoreemid (vastuväiteliselt).

Vaatleme veel järgmist teoreemi ristlõikudest, mida vajame edaspidi.

**28. Teoreem.** Tasapinnal ( $\alpha$ , joon. 17) asetsev sirge ( $DE$ ), mis läbib kaldsirge ( $AC$ ) aluspunkti ja on

**risti kaldsirge projektsiooniga ( $BC$ ), on risti ka kaldsirge endaga.**

Võtame sirgel  $DE$  meelevaldsed, kuid võrdsed lõigud  $CD$  ja  $CE$  ning ühendame sirglõikude abil punktid  $A$  ja  $B$  punktidega  $D$  ja  $E$ . Siis saame, et  $BD=BE$  kui kaldlõigud sirgele  $DE$ , mille aluspunktid  $D$  ja  $E$  asetsevad võrdsel kaugusel ristlõigu  $BC$  aluspunktist  $C$ , ning et  $AD=AE$  kui võrdsete projektsioonidega  $BD$  ja  $BE$  kaldlõigud tasapinnale  $\alpha$ . Seetõttu  $\triangle ADE$  on võrdhaarne kolmnurk ja seega tema mediaan  $AC$  on risti alusega  $DE$ .

Seda teoreemi nimetatakse kolme ristsirge teoreemiks. Tõepoolest, see teoreem käsitleb kolme järgmise ristsirge vahelist seost: 1) ristsirge  $AB$  tasapinnale  $\alpha$ , 2) ristsirge  $BC$  sirgele  $DE$  ja 3) ristsirge  $AC$  samale sirgele  $DE$ .

**29. Pöördteoreem. Tasapinnal ( $\alpha$ , joon. 17) asetsev sirge ( $DE$ ), mis läbib kaldsirge ( $AC$ ) aluspunkti ja on risti kaldsirgega, on risti ka tema projektsiooniga ( $BC$ ).**

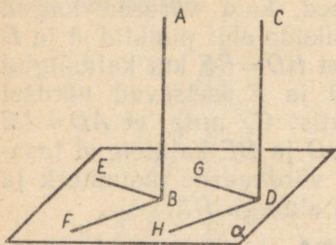
Teeme sama konstruktsiooni, mis otsesegi teoreemi tõestamiseks. Võtame meelevaldsed, kuid võrdsed lõigud  $CD$  ja  $CE$  ning ühendame sirglõikude abil punktid  $A$  ja  $B$  punktidega  $D$  ja  $E$ . Siis saame, et  $AD=AE$  kui kaldlõigud sirgele  $DE$ , mille aluspunktid  $D$  ja  $E$  asetsevad võrdsel kaugusel ristlõigu  $AC$  aluspunktist  $C$ , ning et  $BD=BE$  kui võrdsete kaldlõikude  $AD$  ja  $AE$  projektsioonid. Seetõttu  $\triangle BDE$  on võrdhaarne kolmnurk ja seega tema mediaan  $BC$  on risti alusega  $DE$ .

#### IV. SIRGETE JA TASAPINDADE PARALLEELSUSE JA RISTSEISUDE VAHELINE SEOS.

**30. Eelmärkus.** Sirgete ja tasapindade paralleelsuse ning nende ristseisu vahel valitseb mõnesugune seos. Nimelt ühtede elementide paralleelsus tingib teiste elementide ristseisu ja, ümberpöörduvalt, ühtede elementide ristseisust on võimalik järeldada teiste elementide paralleelsust. See sirgete ja tasapindade paralleelsuse ja ristseisu vaheline seos väljendub järgmistes teoreemides.

**31. Teoreem. Kui tasapind ( $\alpha$ , joon. 18) on risti ühega paralleelsetest sirgetest ( $AB$ ), siis on ta risti ka teisega ( $CD$ ).**

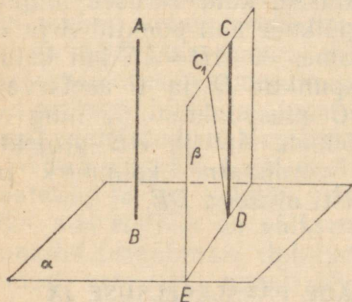
Võtame tasapinnal  $\alpha$  kaks punktist  $B$  väljuvat kiirt  $BE$  ja  $BF$  ning punktist  $D$  tõmbame kiired  $DG$  ja  $DH$ , mis on



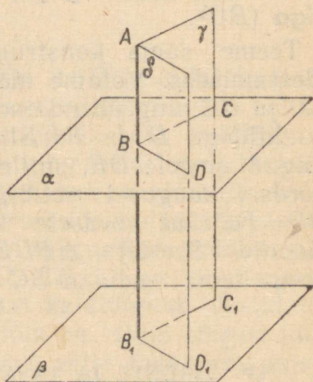
Joon. 18.

vastavalt paralleelsed kiirtega  $BE$  ja  $BF$ . Siis saame, et  $\angle ABE = \angle CDG$  ja  $\angle ABF = \angle CDH$  kui vastavalt paralleelsete ja sama-suunaliste haaradega nurgad. Kuid  $\angle ABE$  ja  $\angle ABF$  on täisnurgad, sest  $AB \perp \alpha$ . Järelikult on  $\angle CDG$  ja  $\angle CDH$  samuti täisnurgad (§ 18). Seega  $CD \perp \alpha$  (§ 24).

**32. Pöördteoreem. Kui kaks sirget ( $AB$  ja  $CD$ , joon. 19) on risti ühe ja sama tasapinnaga, siis nad on paralleelsed.**



Joon. 19.



Joon. 20.

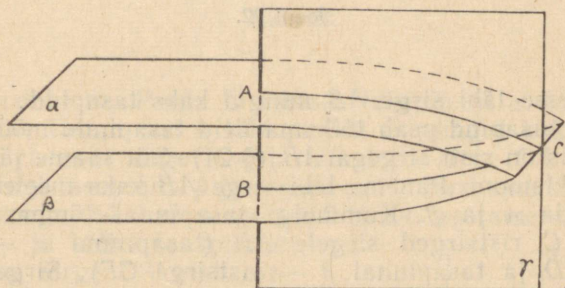
Oletame vastupidist, s. o. et  $AB$  ja  $CD$  ei ole paralleelsed. Võtame siis läbi punkti  $D$  sirge, mis on paralleelne sirgema  $AB$ . Tehtud oletusel on see mingi sirge  $DC_1$ , mis ei ühti sirgema  $DC$ . Otsese teoreemi järgi sirge  $DC_1$  on risti tasapinnaga  $\alpha$ . Läbi sirgete  $CD$  ja  $C_1D$  paneme tasapinna  $\beta$  ning võtame tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikesirge  $DE$ . Et (eelmise teoreemi järgi)  $C_1D \perp \alpha$ , siis  $\angle C_1DE$  on täisnurk, kuid et teoreemi eelduse kohaselt  $CD \perp \alpha$ , siis  $\angle CDE$  on samuti täisnurk. Niiviisi selgub, et tasapinnal  $\beta$  on sir-

gele  $DE$  ühest ja samast punktist  $D$  ehitatud kaks ristsirget  $DC$  ja  $DC_1$ . Et see on võimatu, siis on ka võimatu, et sirged  $AB$  ja  $CD$  ei ole paralleelsed.

**33. Teoreem.** Kui sirge ( $BB_1$ , joon. 20) on risti ühega paralleelsetest tasapindadest ( $\alpha$ ), siis on ta risti ka teisega ( $\beta$ ).

Asetame läbi sirge  $BB_1$  mingid kaks tasapinda  $\gamma$  ja  $\delta$ , milledest kumbki lõikub tasapindadega  $\alpha$  ja  $\beta$  mööda paralleelseid sirgeid; üks mööda sirgeid  $BC$  ja  $B_1C_1$  ning teine mööda sirgeid  $BD$  ja  $B_1D_1$ . Eelduse kohaselt sirge  $BB_1$  on risti sirgetega  $BC$  ja  $BD$ , järelikult ta on risti ka nendega paralleelsete sirgetega  $B_1C_1$  ja  $B_1D_1$  ning seepärast ta on risti ka tasapinnaga  $\beta$ , millel asetsevad sirged  $B_1C_1$  ja  $B_1D_1$ .

**34. Pöördteoreem.** Kui kaks tasapinda ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 21) on risti ühe ja sama sirgega ( $AB$ ), siis nad on paralleelsed.



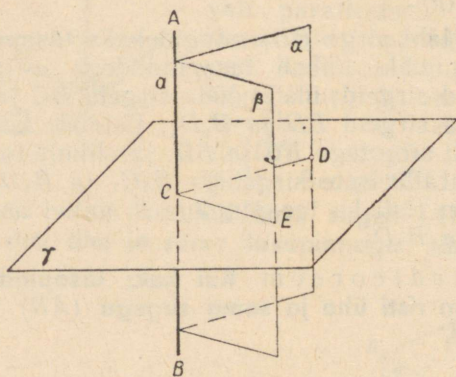
Joon. 21.

Oletame vastupidist, s. o. et tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikuvad. Võtame nende lõikesirgel mingi punkti  $C$  ning paneme tasapinna  $\gamma$  läbi punkti  $C$  ja sirge  $AB$ . Tasapind  $\gamma$  lõikab tasapindu  $\alpha$  ja  $\beta$  vastavalt mööda sirgeid  $AC$  ja  $BC$ . Et  $AB \perp \alpha$ , siis  $AB \perp AC$ , ja et  $AB \perp \beta$ , siis  $AB \perp BC$ . Sel viisil saame tasapinnal  $\gamma$  sirgele  $AB$  kaks ristsirget  $AC$  ja  $BC$ , mis läbivad ühte ja sama punkti  $C$ . Et see on võimatu, siis oletus, et tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikuvad, oli vale. Järelikult tasapinnad on paralleelsed.

## Konstruksioonülesandeid.

35. Läbi antud punkti ehitada tasapind, mis on risti antud sirgega  $AB$  (joon. 22).

Lahendus. 1. juhtum. Antud punkt  $C$  asetseb sirgel  $AB$ .



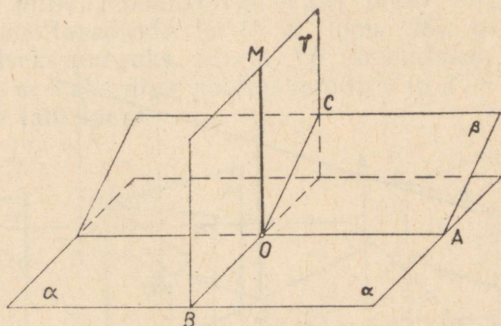
Joon. 22.

Paneme läbi sirge  $AB$  mingid kaks tasapinda  $\alpha$  ja  $\beta$ . Otsitav tasapind peab lõikama neid tasapindu mööda sirgeid, mis on risti sirgega  $AB$  (§ 24). Siit saame järgmise konstruktsiooni. Paneme läbi sirge  $AB$  kaks meelevaldset tasapinda  $\alpha$  ja  $\beta$ . Kummalgi tasapinnal tõmbame läbi punkti  $C$  ristsirged sirgele  $AB$  (tasapinnal  $\alpha$  — ristsirge  $CD$  ja tasapinnal  $\beta$  — ristsirge  $CE$ ). Sirgeid  $CD$  ja  $CE$  läbiv tasapind ongi nõutud tasapind  $\gamma$ .

2. juhtum. Antud punkt  $D$  asetseb väljaspool sirget  $AB$  (joon. 22). Paneme läbi punkti  $D$  ja sirge  $AB$  tasapinna  $\alpha$  ning tõmbame sellel tasapinnal sirge  $DC$  risti sirgega  $AB$ . Läbi sirge  $AB$  paneme veel meelevaldse tasapinna  $\beta$  ning sellel tasapinnal tõmbame sirge  $CE$  risti sirgega  $AB$ . Otsitav tasapind peab lõikama tasapindu  $\alpha$  ja  $\beta$  mööda sirgeid, mis on risti sirgega  $AB$ . Siit saame järgmise konstruktsiooni. Tõmbame tasapinnal  $\alpha$  läbi punkti  $D$  sirge  $DC$  risti sirgega  $AB$ . Sirge  $DC$  lõikab sirget  $AB$  mingis punktis  $C$ . Tasapinnal  $\beta$  tõmbame läbi punkti  $C$  sirge  $CE$  risti sirgega  $AB$ . Sirgeid  $CD$  ja  $CE$  läbiv tasapind ongi nõutud tasapind  $\gamma$ .

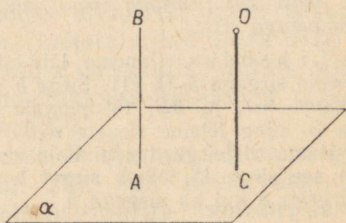
Et kummalgi tasapinnal  $\alpha$  ja  $\beta$  on läbi antud punkti võimalik tõmmata ainult üks sirge, mis on risti antud sirgega, siis mõlemal juhul on ülesandel ainult üks lahend, s. o. läbi iga ruumipunkti on võimalik panna ainult üks tasapind, mis on risti antud sirgega.

36. Läbi antud punkti  $O$  ehitada sirge, mis on risti antud tasapinnaga.



Joon. 23.

1. juh t u m. Punkt  $O$  asetseb tasapinnal  $\alpha$  (joon. 23). Tõmbame tasapinnal  $\alpha$  läbi punkti  $O$  mingid kaks teineteisega ristuvat sirget  $OA$  ja  $OB$ . Läbi sirge  $OA$  paneme veel mingi tasapinna  $\beta$  ja tasapinnal  $\beta$  tõmbame sirge  $OC$  risti sirgega  $OA$ . Läbi sirgete  $OB$  ja  $OC$  asetame uue tasapinna  $\gamma$  ja sellel tasapinnal tõmbame sirge  $OM$  risti sirgega  $OB$ . Sirge  $OM$  ongi nõutud ristsirge tasapinnale  $\alpha$ . Kuna  $OA \perp OB$  ja  $OA \perp OC$ , siis sirge  $OA$  on risti tasapinnaga  $\gamma$  ja järelikult  $OA \perp OM$ . Nii näeme, et  $OM \perp OA$  ja  $OM \perp OB$ , järelikult sirge  $OM$  on risti tasapinnaga  $\alpha$ .



Joon. 24.

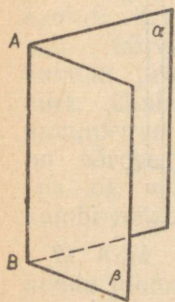
2. juh t u m. Punkt  $O$  asetseb väljaspool tasapinda  $\alpha$  (joon. 24). Võtame tasapinnal  $\alpha$  mingi punkti  $A$  ja teostame sellest lähtudes sama konstruktsiooni, mis eelmisel juhul. Siis saame tasapinnaga  $\alpha$  ristuva sirge  $AB$ .



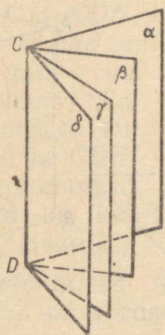
V. KAHETAHULISED NURGAD, SIRGE JA TASAPINNA  
VAHELINE NURK, KIIVSIRGETE-VAHELINE NURK,  
MITMETAHULISED NURGAD.

Kahetahulised nurgad.

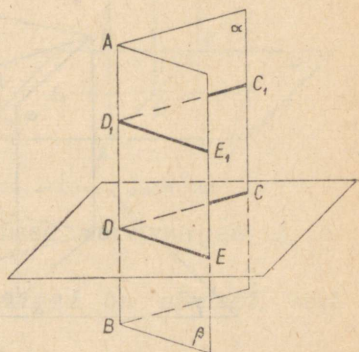
38. **Definitsioonid.** Tasapinna osa, mis asetseb ühel pool selle tasapinna mingit sirget, nimetatakse **pooltasapinnaks**. Kujundit, mille moodustavad kaks ühest sirgest ( $AB$ ) väljuvat pooltasapinda ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 26), nimetatakse **kahetahuliseks nurgaks**. Sirget  $AB$  nimetatakse kahetahulise nurga **servaks** ning pooltasapinda  $\alpha$  ja  $\beta$  — kahetahulise nurga **tahkudeks**.



Joon. 26.



Joon. 27.



Joon. 28.

Kahetahulist nurka tähistatakse tavaliselt tema serva juurde kirjutatud kahe tähega (kahetahuline nurk  $AB$ ). Kui aga ühe serva juures on mitu kahetahulist nurka, siis igaühte neist tähistatakse tema tahkude tähistega (näiteks kahetahuline nurk  $\gamma\delta$  (joon. 27).

Kui serva  $AB$  mingist punktist  $D$  tõmmata kummalgi tahul ristsirged servale (joon. 28), siis nendevahelist nurka  $CDE$  nimetatakse kahetahulise nurga **joonnurgaks**.

Joonnurga suurus ei olene tema tipu asukohast serval. Nii on joonnurgad  $CDE$  ja  $C_1D_1E_1$  võrdsed, sest nende haarad on vastavalt paralleelsed ja samasuunalised.

Joonnurga tasapind on servaga risti, sest temal asetseb kaks servaga ristuvat sirget. Seepärast joonnurga leidmiseks piisab, kui lõigata kahetahulist nurka tasapinnaga, mis on servaga risti.

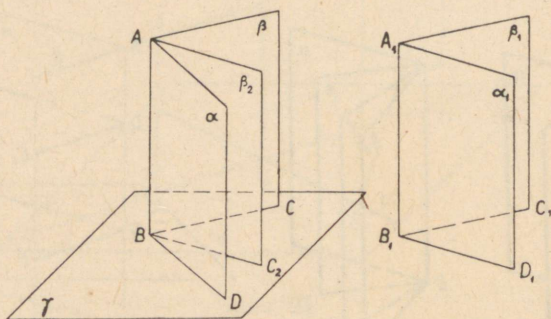
**39. Kahetahuliste nurkade võrdsus ja mittevõrdsus.** Kaht kahetahulist nurka loetakse võrdseiks, kui nad teineteise sisse paigutamisel ühtivad; vastasel korral loetakse väiksemaks seda nurka, mis moodustab osa teisest nurgast.

Analoogiliselt nurkadega planimeetrias võivad ka kahetahulised nurgad olla kõrvunurgad, tippnurgad jt.

Kui kaks kahetahulist kõrvunurka on võrdsed, siis kumbagi neist nimetatakse kahetahuliseks täisnurgaks.

**Teoreem. 1) Võrdsete kahetahuliste nurkade joonnurgad on võrdsed.**

**2) Suuremal kahetahulisel nurgal on suurem joonnurk.**



Joon. 29.

Olgu  $\alpha\beta$  ja  $\alpha_1\beta_1$  (joon. 29) kaks kahetahulist nurka. Paigutame nurga  $\alpha_1\beta_1$  nurga  $\alpha\beta$  sisse nii, et serv  $A_1B_1$  ühtib servaga  $AB$  ja tahk  $\alpha_1$  ühtib tahuga  $\alpha$ . Kui need kahetahulised nurgad on võrdsed, siis tahk  $\beta_1$  ühtib tahuga  $\beta$ . Kui aga nurk  $\alpha_1\beta_1$  on väiksem kui nurk  $\alpha\beta$ , siis tahk  $\beta_1$  satub mingisse asendisse  $\beta_2$  kahetahulise nurga  $\alpha\beta$  sees.

Seda tähele pannud, võtame ühisel serval mingi punkti  $B$  ja paneme sellest läbi tasapinna  $\gamma$  risti servaga  $AB$ . Selle tasapinna lõikumisel kahetahuliste nurkade tahkudega tekivad nende nurkade joonnurgad. On selge, et kui kahetahulised nurgad ühtivad, siis neil on üks ja sama joonnurk; kui nad aga ei ühti, s. o. kui näiteks tahk  $\beta_1$  satub asendisse  $\beta_2$ , siis on suuremal kahetahulisel nurgal ka suurem joonnurk (nimelt  $\angle CBD > \angle C_2BD$ ).

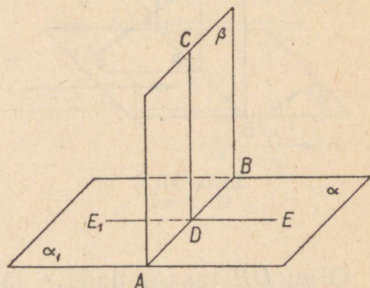
40. Pöördteoreemid. 1) Võrdsetele joonnurkadele vastavad võrdsed kahetahulised nurgad.

2) Suuremale joonnurgale vastab suurem kahetahuline nurk.

Neid teoreeme on kerge tõestada vastuväiteliselt.

41. Järeldused. 1) Kahetahulise täisnurga joonnurk on täisnurk ja ümberpöördult.

Olgu  $\alpha\beta$  (joon. 30) kahetahuline täisnurk. See tähendab, et ta on võrdne oma kõrvunurgaga  $\beta\alpha_1$ . Kuid niisugusel korral on joonnurgad  $CDE$  ja  $CDE_1$  samuti võrdsed; et nad on aga kõrvunurgad, siis kumbki peab olema täisnurk. Ümberpöördult: kui joonnurgad  $CDE$  ja  $CDE_1$  on võrdsed kõrvunurgad, siis on võrdsed ka kahetahulised kõrvunurgad, s. o. kumbi neist on täisnurk.



Joon. 30.

2) Kõik kahetahulised täisnurgad on võrdsed, sest nende joonnurgad on võrdsed.

Samal viisil on kerge tõestada, et:

3) Kahetahulised tippnurgad on võrdsed.

4) Paralleelsete ja samasuunaliste (või vastassuunaliste) tahkudega kahetahulised nurgad on võrdsed.

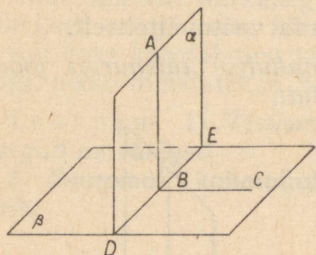
5) Kui kahetahulise nurga mõõtühikuks võtame niisuguse kahetahulise nurga, mis vastab joonnurga mõõtühikule, siis võib öelda, et:

*kahetahulist nurka mõõdab tema joonnurk.*

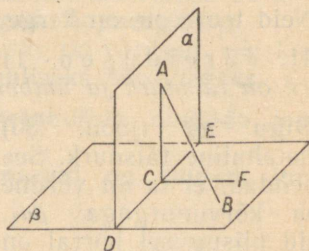
## Risttasapinnad.

42. Definiitsioon. Kahte tasapinda nimetatakse teineteise risttasapindadeks, kui nad moodustavad teineteisega lõikudes kahetahulise täisnurga.

43. Teoreem (kahe tasapinna ristseisu tunnus). Kui tasapind ( $\alpha$ , joon. 31) läbib teise tasapinna ( $\beta$ ) ristsirge ( $AB$ ), siis on ta risti selle tasapinnaga.



Joon. 31.



Joon. 32.

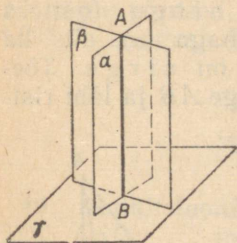
Olgu  $DE$  tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikejoon. Tõmbame tasapinnal  $\beta$  sirge  $BC \perp DE$ . Siis nurk  $ABC$  on kahetahulise nurga  $a\beta$  joonnurk. Et sirge  $AB$  on eelduse põhjal risti tasapinnaga  $\beta$ , siis  $AB \perp BC$ , tähendab, nurk  $ABC$  on täisnurk ja seega ka kahetahuline nurk on täisnurk, s. o. tasapind  $\alpha$  on risti tasapinnaga  $\beta$ .

44. Teoreem. Kui kaks tasapinda ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 31) on teineteisega risti ja ühele neist ( $\beta$ ) on ehitatud ristsirge ( $AB$ ), millel on ühine punkt ( $A$ ) teise tasapinnaga ( $\alpha$ ), siis see ristsirge asetseb täielikult teisel tasapinnal ( $\alpha$ ).

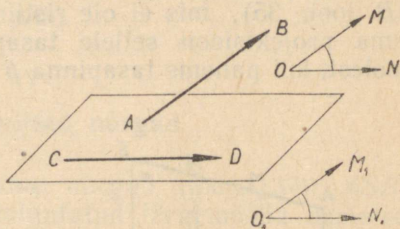
Oletame, et ristsirge  $AB$  ei asetse tasapinnal  $\alpha$  (nagu joonisel 32). Olgu  $DE$  tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikejoon. Tõmbame tasapinnal  $\alpha$  sirge  $AC \perp DE$  ja võtame tasapinnal  $\beta$  sirge  $CF \perp DE$ . Siis nurk  $ACF$  on täisnurk kui kahetahulise täisnurga joonnurk. Seepärast sirge  $AC$ , moodustades sirgetega  $DE$  ja  $CF$  täisnurgad, on risti tasapinnaga  $\beta$ . Meil on siis ühest ja samast punktist  $A$  tasapinnale  $\beta$  ehitatud kaks ristsirget —  $AB$  ja  $AC$ . Et see on võimatu (§ 36), siis oletus on vale, tähendab, ristsirge  $AB$  asetseb tasapinnal  $\alpha$  (§ 36).

45. Järeldus. Kui kaks lõikuvat tasapinda ( $\alpha$  ja  $\beta$ , joon. 33) on risti kolmanda tasapinnaga ( $\gamma$ ), siis ka nende lõikejoon on risti kolmanda tasapinnaga.

Tõepoolest, kui tasapindade  $\alpha$  ja  $\beta$  lõikejoone mingist punktist  $A$  ehitada ristsirge tasapinnale  $\gamma$ , siis see rist-sirge asetseb eelmise teoreemi põhjal tasapinnal  $\alpha$  ja tasapinnal  $\beta$ , tähendab, ta ühtib sirgega  $AB$ .



Joon. 33.



Joon. 34.

### Kahe kiivsirge vaheline nurk.

**46. Definiitsioon.** Kahe kiivsirge ( $AB$  ja  $CD$ , joon. 34) vaheliseks nurgaks, kui kiivsirgete asendid ja suunad on antud, nimetatakse niisugust nurka ( $MON$ ), mille saame, kui ruumis vabalt võetud punktist ( $O$ ) ehitame antud kiivsirgetega ( $AB$  ja  $CD$ ) vastavalt paralleelsed ja samasuunalised kiired ( $OM$  ja  $ON$ ).

Selle nurga suurus ei olene punkti  $O$  asukohast, sest kui näidatud viisil ehitame nurga  $M_1O_1N_1$  tipuga mingis punktis  $O_1$ , siis  $\angle MON = \angle M_1O_1N_1$ , sest neil nurkadel on vastavalt paralleelsed ja samasuunalised haarad.

### Nurk sirge ja tasapinna vahel.

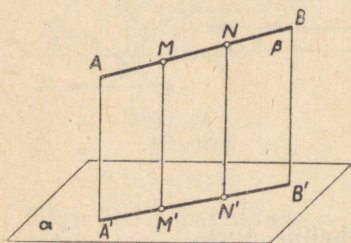
**47. Punkti ja sirgjoone projektsioon tasapinnal.** Varem ütlesime (§ 25), et kui ühest ja samast punktist on tasapinnale ehitatud ristlõik ja kaldlõik, siis selle kaldlõigu projektsiooniks tasapinnal nimetatakse lõiku, mis ühendab ristlõigu ja kaldlõigu aluspunkte. Nüüd anname projektsiooni jaoks üldisema definiitsiooni.

1) *Mingi punkti normaalprojektsiooniks* (ehk ristprojektsiooniks) antud tasapinnal (näiteks punkti  $M$  pro-

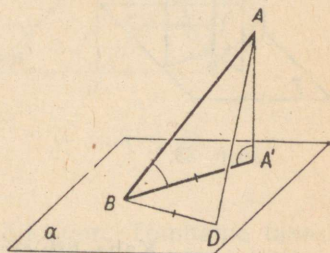
jektsooniks tasapinnal  $\alpha$ , joon. 35) nimetatakse punktist tasapinnani ehitatud ristlõigu aluspunkti ( $M'$ ).

2) Mingi joone normaalprojektsiooniks tasapinnal nimetatakse selle joone punktide projektsioonidest koosnevat joont.

Eriti, kui projekteeritav joon on sirge (näiteks  $AB$ , joon. 35), mis ei ole risti tasapinnaga ( $\alpha$ ), siis ka tema projektsioon sellele tasapinnale on sirge. Tõepoolest, kui paneme tasapinna  $\beta$  läbi sirge  $AB$  ja läbi rist-



Joon. 35.



Joon. 36.

sirge  $MM'$ , mis on tõmmatud projektsioonitasapinnale sirge  $AB$  mingist punktist  $M$ , siis see tasapind peab olema risti tasapinnaga  $\alpha$ ; seepärast sirge  $AB$  mistahes punktist (näiteks punktist  $N$ ) tasapinnale  $\alpha$  ehitatud ristsirge peab asetsema tasapinnal  $\beta$  (§ 44), järelikult sirge  $AB$  iga punkti projektsioon peab asetsema sirgjoonel  $A'B'$ , mida mööda lõikuvad tasapinnad  $\alpha$  ja  $\beta$ . Ümberpöörduvalt: sirge  $A'B'$  iga punkt on sirge  $AB$  mingi punkti projektsiooniks, sest sirge  $A'B'$  mistahes punktist ehitatud ristsirge asetseb tasapinnal  $\beta$  ja lõikub järelikult sirgega  $AB$ . Seega sirge  $A'B'$  on antud sirge  $AB$  punktide projektsioonidest koosnev joon, järelikult tema projektsioon.

Lühiduse pärast ütleme «normaalprojektsiooni» asemel lihtsalt «projektsioon».

**48. Sirge ja tasapinna vaheline nurk.** Juhul kui sirge on tasapinnaga kaldu, siis sirge ( $AB$ , joon. 36) ja tasapinna ( $\alpha$ ) vaheliseks nurgaks nimetatakse teravnurka ( $ABA'$ ) selle sirge ja tema projektsiooni vahel.

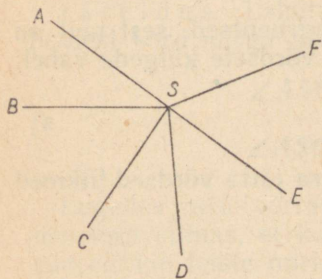
Sellel nurgal on see omadus, et ta on väiksem kõikidest nurkadest, mis kaldsirge moodustab tasapinnal  $\alpha$

asetsevate ja kaldsirge aluspunkti läbivate sirgetega. Tõestame näiteks, et nurk  $ABA'$  on väiksem kui nurk  $ABD$ .

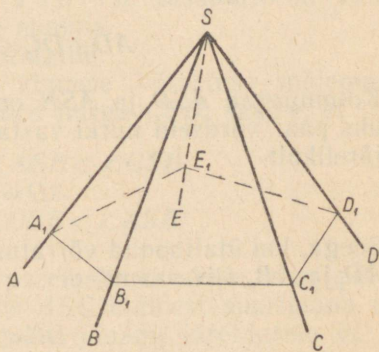
Selleks võtame lõigu  $BD=BA'$  ja ühendame punkti  $D$  punktiga  $A$ . Kolmnurga  $ABA'$  kaks külge on kolmnurga  $ABD$  kahe küljega vastavalt võrdsed, kuid kolmandad küljed ei ole võrdsed, nimelt  $AD > AA'$  (§ 26). Seetõttu nurk  $ABD$  on nurgast  $ABA'$  suurem.

### Mitmetahulised nurgad.

**49. Definitsioonid.** Võtame nurgad (joon. 37):  $ASB$ ,  $BSC$ ,  $CSD$ , ..., mis on paigutatud järgemööda üksteise külge nii, et nad asetsevad ühel tasapinnal ja et neil on ühine tipp  $S$ . Pöörame nurga  $ASB$  tasapinna ümber haara  $SB$  nii, et see tasapind moodustaks tasapinnaga  $BSC$  mingi kahetahulise nurga. Seejärel, muutmata saadud kahetahulist nurka, pöörame viimast ümber sirge  $SC$  nii, et tasapind  $BSC$  moodustaks tasapinnaga  $CSD$  mingi kahetahulise nurga. Jätkame säärast järkjärgulist pöörast iga ühise haara ümber. Kui seejuures viimane haar  $SF$  ühtib esimese haaraga  $SA$ , siis tekib kujund (joon. 38), mida nimetatakse **mitmetahuliseks nurgaks**. Nurki  $ASB$ ,  $BSC$ , ... nimetatakse mitmetahulise nurga **tasanutkadeks** ehk **tahkudeks**, haarasid  $SA$ ,  $SB$ , ... nimetatakse **servadeks** ning ühist tippu  $S$  nimetatakse mitmetahulise nurga **tipuks**. Mitmetahulise nurga iga serv on ühtlasi kahe-



Joon. 37.



Joon. 38.

tahulise nurga servaks, seepärast on mitmetahulisel nurgal nii mitu kahetahulist nurka ja nii mitu tasanurka, kui mitu serva tal on. Mitmetahulise nurga väikseim tahkude arv on kolm; niisugust nurka nimetatakse **kolmetahuliseks** nurgaks. Mitmetahulised nurgad võivad olla neljatahulised, viietahulised jne.

Mitmetahulist nurka tähistatakse kas tipu juures oleva ühe tähega  $S$  või tähtede reaga  $SABCDE$ , milledest esimene tähistab tippu ning teised — järjestikku asetsevate servade punkte.

Mitmetahulist nurka nimetatakse **kumeraks**, kui ta asetseb tervenisti ühel pool iga tahu tasapinda. Selline on näiteks nurk, mis on kujutatud joonisel 38. Kuid mitmetahulist nurka, mis on kujutatud joonisel 39, ei või nimetada kumeraks, sest ta asetseb kahel pool tahu  $ASB$  tasapinda ja kahel pool tahu  $BSC$  tasapinda. Kui tasapinnaga lõigata mitmetahulise nurga kõiki tahke, siis tekib hulknurk  $(A_1B_1C_1D_1E_1)$ . Kumeral mitmetahulisel nurgal on see hulknurk kumer.

Meie käsitleme ainult kumeraid mitmetahulisi nurki.

**50. Teoreem. Kolmetahulise nurga iga tasanurk on väiksem kui teiste tasanurkade summa.**

Olgu kolmetahulise nurga  $SABC$  (joon. 40) tasanurkadest suurim nurk  $ASC$ . Paigutame sellele nurgale nurga  $ASD$ , mis on võrdne nurgaga  $ASB$ , ja võtame mingi sirge  $AC$ , mis lõikab sirget  $SD$  mingis punktis  $D$ . Võtame lõigu  $SB=SD$ . Ühendades punkti  $B$  punktidega  $A$  ja  $C$ , saame kolmnurga  $ABC$ , milles

$$AD + DC < AB + BC.$$

Kolmnurgad  $ASD$  ja  $ASB$  on kongruentsed, sest neil on üks paar võrdseid nurki vastavalt võrdsete külgede vahel; järelikult

$$AD = AB.$$

Seega, kui ülaltoodud võrratuses ära jätta võrdsed liikmed  $AD$  ja  $AB$ , siis saame, et

$$DC < BC.$$

Nüüd näeme, et kolmnurga  $SCD$  kaks külge on võrdsed

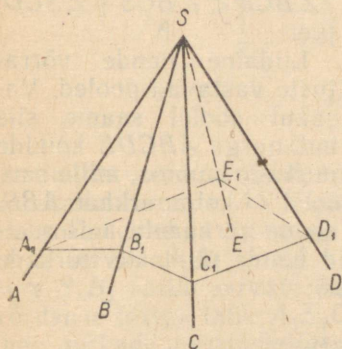
kolmnurga  $SCB$  kahe küljega, kuid kolmandad küljed ei ole võrdsed; säärasel juhul suurema külje vastas asetseb suurem nurk, tähendab

$$\angle CSD < \angle CSB.$$

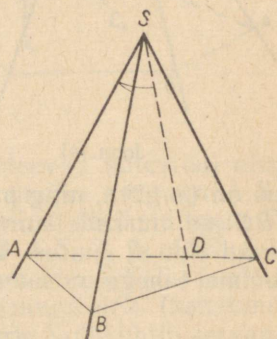
Lisades selle võrratuse vasakule poolele nurga  $ASD$  ja paremale poolele temaga võrdse nurga  $ASB$ , saame võrratuse

$$\angle ASC < \angle CSB + \angle ASB,$$

mida pidimegi tõestama.



Joon. 39.



Joon. 40.

Meie tõestame, et isegi suurim tasanurk on väiksem kui teiste tasanurkade summa.

Tähendab, teoreem on tõestatud.

Järeldus. Lahutades viimase võrratuse mõlemast poolst kord nurga  $ASB$ , kord nurga  $CSB$ , saame, et

$$\angle ASC - \angle ASB < \angle CSB$$

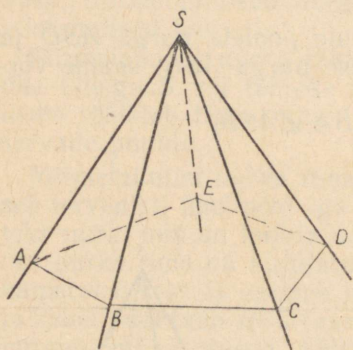
ja

$$\angle ASC - \angle CSB < \angle ASB.$$

Lugedes neid võrratusi paremalt vasakule ning pidades veel silmas, et ka nurk  $ASC$  kõlmeist suurimana on suurem kui teiste nurkade vahe, jõuame järeldusele, et kolmetahulise nurga iga tasanurk on suurem kui teiste tasanurkade vahe.

51. Teoreem. **Kumera mitmetahulise nurga tasanurkade summa on väiksem kui  $2\pi$ .**

Lõikame kumera mitmetahulise nurga  $SABCDE$  (joon. 41) tahke mingi tasapinnaga; lõikeks saame kumera hulknurga  $ABCDE$ .



Joon. 41.

Rakendades eelmise paragrahvi teoreemi igale kolmetahulisele nurgale, mille tipud asetsevad punktides  $A, B, C, D$  ja  $E$ , saame, et

$$\angle ABC < \angle ABS + \angle SBC;$$

$$\angle BCD < \angle BCS + \angle SCD;$$

jne.

Liidame nende võrratuste vastavad pooled. Vasakul poolel saame siis hulknurga  $ABCDE$  kõikide nurkade summa, mille suurus on  $(n-2)\pi$ , ning paremal poolel — kolmnurkade  $ABS, SBC$  jne. nurkade summa ilma nende nurkadeta, mis asetsevad tipu  $S$  juures. Tähistanud nende viimaste nurkade summa tähega  $x$ , saame liitmisel:

$$(n-2)\pi < n\pi - x.$$

Et vahedel  $n\pi - 2\pi$  ja  $n\pi - x$  vähendatavad on võrdsed, siis selleks, et esimene vahe oleks teistest väiksem, peab lahutatav  $2\pi$  olema lahutatavast  $x$  suurem, tähendab

$$2\pi > x,$$

s. o.

$$x < 2\pi.$$

**Kolmetahuliste nurkade võrdsuse lihtsamad juhud.**

52. Teoreemid. **Kolmetahulised nurgad on võrdsed, kui neil on**

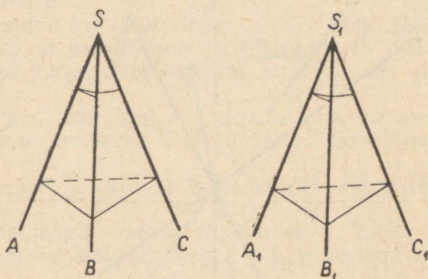
1) üks paar võrdseid kahetahulisi nurki vastavalt võrdsete ja ühte viisi asetsevate tasanurkade vahel või

2) üks paar võrdseid tasanurki vastavalt võrdsete ja ühte viisi asetsevate kahetahuliste nurkade vahel.

1) Olgu  $S$  ja  $S_1$  kaks kolmetahulist nurka (joon. 42), millel

$$\angle ASB = \angle A_1S_1B_1,$$

$$\angle ASC = \angle A_1S_1C_1$$



Joon. 42.

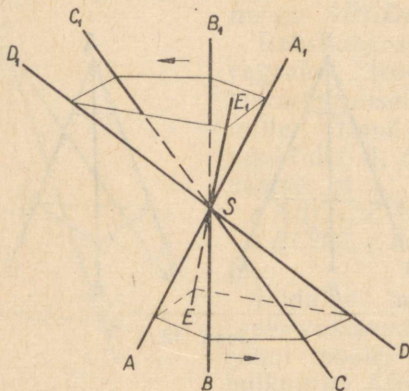
(seejuures need võrdsed nurgad asetsevad ühte viisi) ning kahetahuline nurk  $AS$  võrdub kahetahulise nurgaga  $A_1S_1$ . Paigutame nurga  $S_1$  nurga  $S$  sisse nii, et ühtiks tipud  $S_1$  ja  $S$ , servad  $S_1A_1$  ja  $SA$  ning tahud  $A_1S_1B_1$  ja  $ASB$ . Siis serv  $S_1B_1$  satub servale  $SB$  (tasanurkade  $A_1S_1B_1$  ja  $ASB$  võrdsuse tõttu), tahk  $A_1S_1C_1$  ühtib tahuga  $ASC$  (kahetahuliste nurkade võrdsuse tõttu) ning serv  $S_1C_1$  ühtib servaga  $SC$  (tasanurkade  $A_1S_1C_1$  ja  $ASC$  võrdsuse tõttu). Seega need kolmetahulised nurgad ühtivad kõigis servades, s. t. nad on võrdsed.

2) Teine tunnus tõestatakse nagu esimenegi sissepaigutamise teel.

**53. Sümmeetrilised mitmetahulised nurgad.** Nagu teada, tippnurgad on võrdsed, kui neid nurki moodustavad sirged või tasapinnad. Vaatame, kas see väide on õige ka mitmetahuliste nurkade kohta.

Pikendame mitmetahulise nurga  $SABCDE$  kõiki servi tipust  $S$  (joon. 43), siis saame teise mitmetahulise nurga  $SA_1B_1C_1D_1E_1$ , mida esimese suhtes võib nimetada **tippnurgaks**. Ei ole raske näha, et nende nurkade tasanurgad on vastavalt võrdsed ja et ka kahetahulised nurgad on vastavalt võrdsed, kuid nii need kui ka teised asetsevad vastupidises järjekorras. Tõepoolest, kui kujutleme vaatlejat, kes väljaspool kahetahulist nurka vaatab tema tippu, siis servad  $SA$ ,  $SB$ ,  $SC$ ,  $SD$ ,  $SE$  on järjestatud

kellaosuti liikumisele vastupidises suunas, kuid vaadates nurka  $SA_1B_1C_1D_1E_1$  nähakse servi  $SA_1, SB_1 \dots$  järjestatult kellaosuti liikumise suunas.



Joon. 43.

Vastupidi järjestatud vastavalt võrdsete tasanurkadega ja vastavalt võrdsete kahetahuliste nurkadega mitmetahulised nurgad ei saa üldse ühtida sissepaigutamise teel. Sääraseid nurki nimetatakse sümmeetrilisteks (punkti  $S$  suhtes). Kujundite sümmeetriast ruumis kõneleme üksikasjalisemalt edaspidi.

#### HARJUTUSI.

Tõestada teoreemid:

1. Kaks tasapinda, mis on paralleelsed kolmanda tasapinnaga, on omavahel paralleelsed.
2. Kõik ühte punkti läbivad antud tasapinnaga paralleelsed sirged asetsevad ühes tasapinnas, mis on paralleelne antud tasapinnaga.
3. Kui tasapind  $\alpha$  on paralleelne sirgega  $a$ , siis sirge  $a$  kõik punktid asetsevad võrdsetel kaugustel sellest tasapinnast.
4. Ühe paralleeltasapinna punktid asetsevad võrdsetel kaugustel teisest paralleeltasapinnast.
5. Kui kahest lõikuvast tasapinnast kumbki läbib ühte kahest paralleelsest sirgest, siis nende tasapindade lõikesirge on paralleelne nende sirgetega.

6. Kui sirge  $a$  on paralleelne tasapinnal  $a$  asetseva sirgega  $b$ , siis iga tasapind, mis lõikub tasapinnaga  $a$  ja läbib sirget  $a$ , lõikub tasapinnaga  $a$  kas sirgega  $b$  paralleelset sirget mööda või mööda sirget  $b$ .

7. Kui sirge  $a$  on paralleelne tasapinnaga  $a$ , siis iga sirge, mis läbib tasapinnal  $a$  asetsevat punkti ja on paralleelne sirgega  $a$ , asetseb tasapinnal  $a$ .

8. Kui on antud kaks kiivsirget  $a$  ja  $b$  ning läbi esimese sirge on pandud tasapind paralleelselt teise sirgega ja läbi teise sirge on pandud tasapind paralleelselt esimese sirgega, siis need tasapinnad on paralleelsed.

9. Kõik sirged, mis läbivad sirge  $a$  ühte ja sama punkti ning on risti sirgega  $a$ , asetsevad ühel ja samal tasapinnal, mis on risti sirgega  $a$ .

10. Kui tasapind ja sirge on risti ühe ja sama sirgega, siis nad on paralleelsed.

11. Kui tasapinnaga  $a$  paralleelne sirge  $a$  lõikub sirgega  $b$ , mis on risti selle tasapinnaga, siis sirged  $a$  ja  $b$  on omavahel risti.

### Konstruksioonülesandeid.

12. Läbi antud punkti ehitada kahe antud sirgega  $a$  ja  $b$  paralleelne tasapind.

13. Läbi antud punkti ehitada antud tasapinnaga paralleelne sirge, mis lõikub antud sirgega.

14. Ehitada sirge, mis lõikub kahe antud sirgega ja on paralleelne kolmanda antud sirgega.

15. Ehitada mingi sirge, mis lõikab kahte antud sirget ja on paralleelne antud tasapinnaga (määramatu ülesanne).

16. Ehitada mingi sirge, mis lõikab kolme antud sirget (määramatu ülesanne).

17. Läbi antud punkti ehitada sirge, mis on risti kahe antud kiiv-sirgega.

18. Läbi antud sirge ehitada tasapind, mis on risti antud tasapinnaga.

19. Antud on: tasapind  $a$  ja sirge  $a \parallel \alpha$ . Ehitada läbi sirge  $a$  tasapind, mis lõikub tasapinnaga  $a$  ja moodustab temaga antud nurga.

20. Antud on tasapind  $a$  ning ühel pool seda tasapinda punktid  $A$  ja  $B$ . Leida tasapinnal  $a$  punkt  $C$  nii, et summa  $AC + CB$  oleks vähim.

## Teine peatükk.

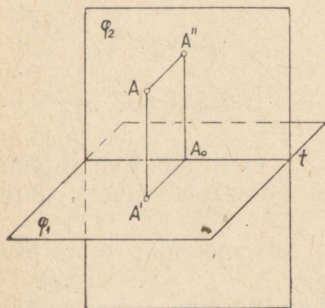
### PUNKTI, LÕIGU JA KUJUNDI RISTPROJEKTSIOONID.

54. Punkti kujutamine kahel tasapinnal tema projektioonide abil. Kujutleme kahte projektsoonitasapinda, horisontaalset ehk põhitasapinda  $\varphi_1$  ja vertikaalset ehk püsttasapinda  $\varphi_2$ , mis lõikuvad täisnurgi mööda sirget  $t$ , mida nimetame projektsooniteljeks (joon. 44). Need tasapinnad moodustavad neli kahetahulist nurka, milledest vaatleme lihtsuse pärast ainult ühte, nimelt eesmist ülal. Oletame, et selle nurga sisepiirkonnas asetseb mingi punkt  $A$ . Tõmbame sellest punktist ristlõigud tasapindadele  $\varphi_1$  ja  $\varphi_2$ . Siis saame nendel tasapindadel punkti  $A$  projektioonid:  $A'$  on **põhiprojektsoon**,  $A''$  — **püstprojektsoon** (neid nimetatakse **normaal-** ehk **ristprojektsoonideks**, ka **ortogonaalprojektsoonideks**, sest nad tekivad rist-sirgete abil).

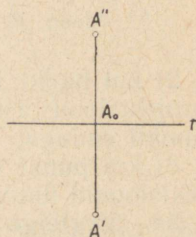
Projektsoone tähistatakse harilikult sama tähega, millega on tähistatud projekteeritav punkt, lisades tähele märgikesed ' (prim) ja '' (sekund) vastavalt esimese ja teise projektsooni puhul. Ristlõike, mille abil saadakse punkti projektioonid, nimetatakse **projekteerijateks**:  $AA'$  on ülalt-projekteerija ning  $AA''$  on eest-projekteerija.

Projekteerijaid läbiv tasapind on risti nii tasapinnaga  $\varphi_1$  kui ka tasapinnaga  $\varphi_2$  (§ 43), järelikult ka risti teljega  $t$  (§ 45) ja seepärast on lõigud  $A'A_0$  ja  $A''A_0$ , mida mööda see tasapind lõikub tasapindadega  $\varphi_1$  ja  $\varphi_2$ , risti teljega  $t$ ; seega nad moodustavad tasapindade  $\varphi_1$  ja  $\varphi_2$  vahelise kahetahulise nurga joonnurga, ning et kahetahuline nurk on täisnurk, siis ka tema joonnurk on täisnurk. Nii on nelinurk  $AA'A_0A''$  ristkülik, mille tasapind on risti teljega  $t$ .

Seda silmas pidades pöörame horisontaalset pooltasapinda  $\varphi_1$  telje  $t$  ümber  $90^\circ$  võrra allapoole; siis ühtib ta alumise vertikaalse pooltasapinnaga, moodustades ülemisega ühise vertikaalse tasapinna. Seejuures punktid  $A_0$  ja  $A''$  jäävad paigale, kuid punkt  $A'$  saab asukoha allpool telge  $t$  ning tuleb ristlõigu  $A''A_0$  pikendusel kaugusele  $A_0A'$ , mis on võrdne lõiguga  $AA''$ . Saame tasapinnale laotatud joonise (joon. 45), mida edaspidi nimetame **epüüriks**;



Joon. 44.



Joon. 45.

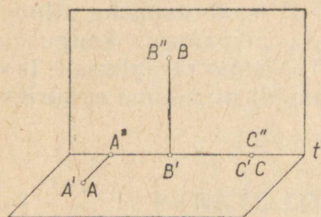
see joonis koosneb sirgest  $t$ , mis kujutab projektsiooni-  
telge, ja kahest punktist, mis asetsevad telje  $t$  ristjoonel;  
alumine punkt on punkti  $A$  põhiprojektsioon ja ülemine  
on püstprojektsioon.

Igale kahetahulise nurga (joon. 44) sisepiirkonnas võetud punktile  $A$  vastab joonisel muidugi kaks üheselt määratud punkti  $A'$  ja  $A''$ , mis asetsevad telje  $t$  rist-sirgel. Ümberpöörduvalt, epüüri igale kahele punktile  $A'$  ja  $A''$ , mis asetsevad telje  $t$  ristsirgel (punkt  $A'$  allpool ja punkt  $A''$  ülalpool telge  $t$ ), vastab üks määratud punkt  $A$  kahetahulise nurga sisepiirkonnas.

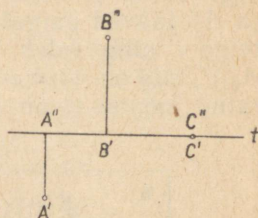
Et saada seda punkti, peame kujutlema, et joonise alu-  
mine pool on pööratud telje  $t$  ümber  $90^\circ$  võrra ülespoole,  
s. o. tagasi oma endisesse asendisse, ning et seejärel on  
punktidest  $A'$  ja  $A''$  võetud kahetahulist nurka moodusta-  
vate tasapindade ristsirged; nende sirgete lõikepunkt ongi  
punkt  $A$ .

55. **Erijuhud:** Joonistest 46 ja 47 selgub, et

1) kui punkt  $A$  asetseb põhitasapinnal, siis tema püstprojektsioon  $A''$  asetseb teljel  $t$  ja põhiprojektsioon ühtib punkti endaga;



Joon. 46.

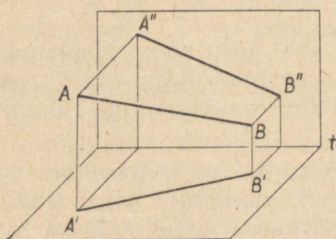


Joon. 47.

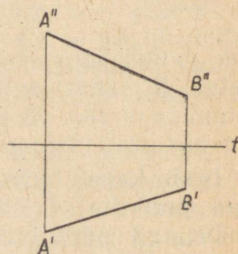
2) kui punkt  $B$  asetseb püsttasapinnal, siis tema põhiprojektsioon asetseb teljel  $t$  ja püstprojektsioon ühtib punkti endaga;

3) kui punkt  $C$  asetseb teljel  $t$ , siis mõlemad tema projektsioonid ühtivad punkti endaga.

**56. Sirglõigu kujutamine.** Meie nägime juba (§ 47), et kui projekteeritav joon on sirge, siis ka tema projektsioon on sirge.



Joon. 48.



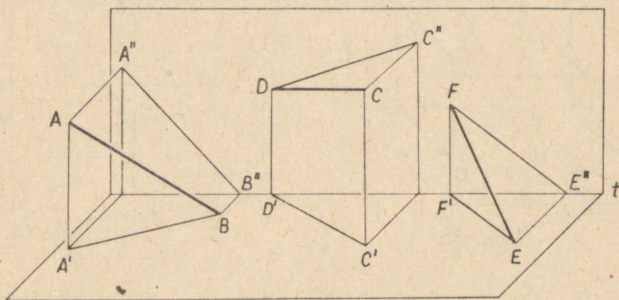
Joon. 49.

Tähendab sirglõiku, mis ühendab punkte  $A$  ja  $B$  (joon. 48), kujutavad epüüril (joon. 49) lõigud  $A'B'$  ja  $A''B''$ , milledest esimene on lõigu  $AB$  põhiprojektsioon ja teine on püstprojektsioon.

Et saada sirgjoone projektsiooni mingil tasapinnal, selleks on vaja leida tema kahe punkti projektsioonid sellel tasapinnal ning läbi nende projektsioonide joonestada sirgjoon.

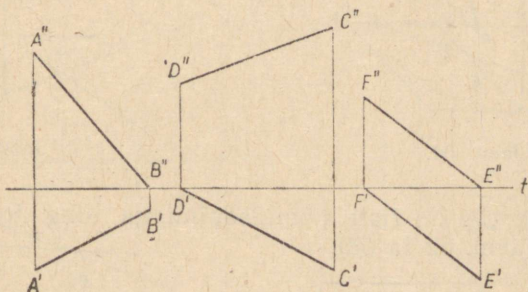
Sirgjoone projektsiooni võib saada ka teisiti: nimelt võime läbi selle sirge panna kaks tasapinda — ühe risti põhitasapinnaga, teise risti püsttasapinnaga. Neid tasapindu nimetame **projekteeritavateks tasapindadeks**.

Nende tasapindade lõikumine projektsioonitasapindadega annab lõigu  $AB$  projektsioonid  $A'B'$  ja  $A''B''$ .



Joon. 50.

Märgime siinjuures, et kui sirglõik on tähistatud tähtedega  $AB$ , siis tähistatakse tema projektsioone tähtedega  $A'B'$  (põhiprojektsioon) ja  $A''B''$  (püstprojektsioon); kui



Joon. 51.

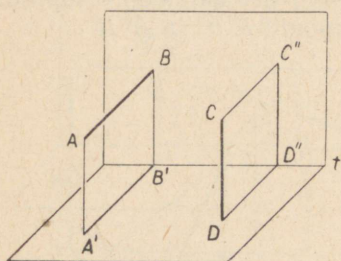
sirge on tähistatud ühe tähega, näiteks tähega  $k$ , siis tema projektsioone tähistatakse ka ühe tähega:  $k'$  (põhiprojektsioon) ja  $k''$  (püstprojektsioon).

57. Erijuhud. 1) Lõigu  $AB$  üks otspunkt asetseb põhitasapinnal.

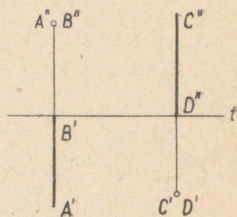
2) Lõigu  $CD$  üks otspunkt asetseb püsttasapinnal.

3) Lõik  $EF$  toetub oma otspunktidega projektsiooni-  
tasapindadele.

Need kolm juhtu on kujutatud näitlikult joonisel 50  
ning projektsioonidena epüüril joonisel 51.

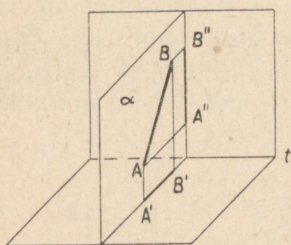


Joon. 52.

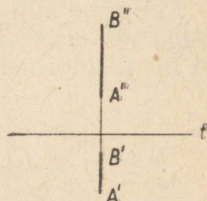


Joon. 53.

4) Lõik  $AB$  on risti püsttasapinnaga ning toetub vii-  
masele (joon. 52 ja 53).

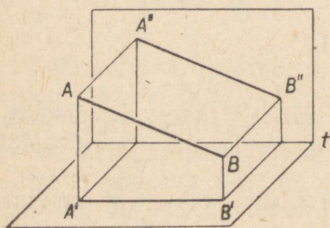


Joon. 54.

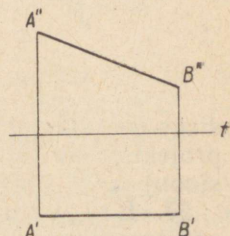


Joon. 55.

5) Lõik  $CD$  on risti põhitasapinnaga ning toetub vii-  
masele (joon. 52 ja 53).



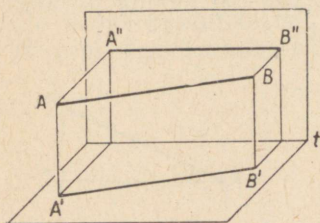
Joon. 56.



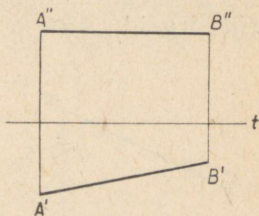
Joon. 57.

6) Lõik  $AB$  asetseb mingil tasapinnal  $\alpha$ , mis on risti teljega  $t$ . Siis mõlemad projekteerivad tasapinnad ühtivad tasapinnaga  $\alpha$  ja seetõttu lõigud  $A'B'$  ja  $A''B''$  asetsevad epüüril telje  $t$  ühel ja samal ristsirgel (joon. 54 ja 55).

7) Lõik  $AB$  on paralleelne püsttasapinnaga. Siis tema põhiprojektsioon on paralleelne teljega  $t$  (joon. 56 ja 57) ja püstprojektsioon on võrdne ning paralleelne lõiguga  $AB$ .

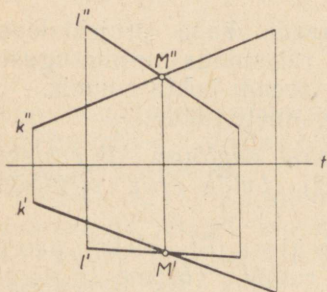


Joon. 58.

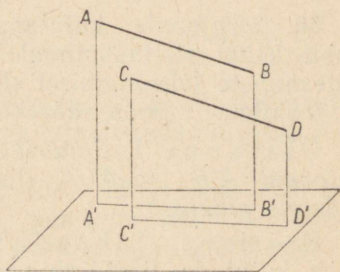


Joon. 59.

8) Lõik  $AB$  on paralleelne põhitasapinnaga (joon. 58 ja 59); tema püstprojektsioon on siis paralleelne teljega  $t$  ja põhiprojektsioon on võrdne ning paralleelne lõigu  $AB$  endaga.



Joon. 60.

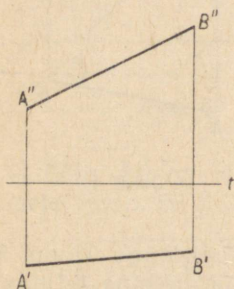


Joon. 61.

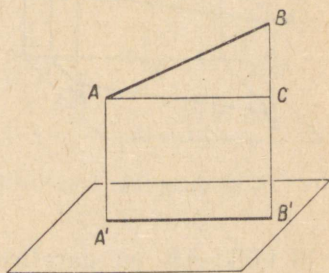
**58. Lõikuvate sirgete projektsioonid.** On ilmne, et kui kaks sirget ( $k$  ja  $l$ ) lõikuvad, siis lõikuvad ka nende ühenimelised projektsioonid (joon. 60), kusjuures lõikepunktid  $M'$  ja  $M''$  asetsevad telje  $t$  ühel ja samal ristsirgel. Ümberpöörduvalt, kui kahe sirge ühenimelised projektsioonid lõikuvad, kusjuures lõikepunktid asetsevad telje  $t$  ühel ja

samal ristsirgel, siis lõikuvad ka need sirged ise, sest projektsioonide lõikepunktidega määratud punkt ( $M'$ ,  $M''$ ) kuulub mõlemale sirgele.

**59. Paralleelsete sirgete projektsioonid on paralleelsed.** Tõepoolest, kui  $AB \parallel CD$  (joon. 61), siis on nurkade  $BAA'$  ja  $DCC'$  haarad paralleelsed ja seega on ka projekteerivad tasapinnad paralleelsed (§ 15), kuid paralleelsed tasapinnad lõikuvad kolmanda tasapinnaga ( $\varphi$ ) mööda paralleelset sirgeid ( $A'B'$  ja  $C'D'$ ) (§ 16).



Joon. 62.



Joon. 63.

**60.** Sirgjoonte kujutamist nende kahe projektsiooni abil kahel risttasapinnal võib rakendada mitmesuguste ülesannete lahendamisel sirgete asendi kohta ruumis.

Vaatleme mõnda säärase ülesannete näidet.

Ülesanne 1. *Epüüril on antud sirglõigu  $AB$  projektsioonid  $A'B'$  ja  $A''B''$  (joon. 62). Leida selle sirglõigu tõeline pikkus.*

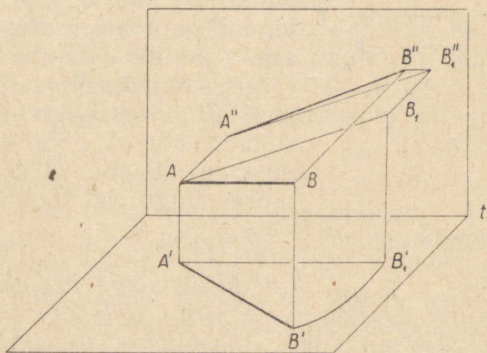
Esimene lahendamisviis. Et oleks parem ette kujutada sirglõigu asendit ruumis, võtame sirglõigu  $AB$  ja tema põhiprojektsiooni  $A'B'$  näitliku kujutise (joon. 63), s. o. niisuguse kujutise, mida kasutasime esimeses peatükis.

Nelinurk  $ABB'A'$  on täisnurkne trapets täisnurkadega punktide  $A'$  ja  $B'$  juures. Võttes selles trapetsis küljega  $A'B'$  paralleelse lõigu  $AC$ , saame täisnurkse kolmnurga  $ABC$ .

Lõik  $AB$  on selles kolmnurgas hüpotenuusiks, kaatet  $AC$ , nagu näha, on võrdne lõigu  $AB$  põhiprojektsiooniga

$A'B'$ . See projektsioon on joonisel antud. Kaatet  $BC$  on võrdne lõikude  $BB'$  ja  $AA'$  vahega.

Lõigud  $BB'$  ja  $AA'$  on samuti joonisel antud; nad on nimelt võrdsed punktide  $B''$  ja  $A''$  kaugustega teljest  $t$ , seega võib nende vahe joonisel leida. Lõikude  $BB'$  ja  $AA'$  vahe võrdub seega punktide  $B''$  ja  $A''$  ning telje  $t$  vaheliste kauguste vahega. Siit järeldub, et lõigu  $AB$  tõelise pikkuse leidmiseks tuleb ehitada täisnurkne kolmnurk, mille üheks kaatetiks on otsitava lõigu põhiprojektsioon  $A'B'$  ning teiseks kaatetiks on lõik, mis võrdub otsitava



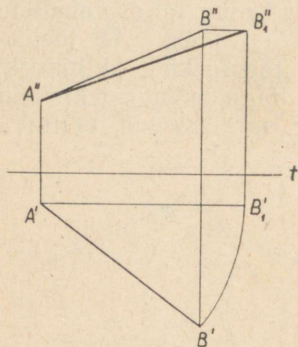
Joon. 64.

lõigu otspunktide püstprojektsioonide  $A''$  ja  $B''$  kauguste vahega teljest  $t$ . Selle kolmnurga hüpotenuus on lõigu  $AB$  tõeliseks pikkuseks.

Teine viis. Kujutleme, et lõik  $AB$  ja lõik  $AA'$  on teineteisega jäigalt kinnitatud; pöörame lõiku  $AB$  sirge  $AA'$  ümber seni, kuni ta saab paralleelseks püsttasapinnaga (joon. 64).

Säärasel lõigu  $AB$  pööramisel tema projektsioonid  $A'B'$  ja  $A''B''$  muutuvad, kuid tema kaldenurk lõigu  $AA'$  suhtes ei muutu, seega ei muutu ka tema põhiprojektsiooni pikkus (muutub ainult selle siht). Täheandab, sellel lõigu pööramisel tema põhiprojektsioon muutub nii, et punkt  $A'$  jääb joonisel paigale ja punkt  $B'$  liigub ringjoone kaart mööda. Kui lõik  $AB$  saab paralleelseks püsttasapinnaga, siis tema põhiprojektsioon saab paralleelseks teljega  $t$ . Ka püstprojektsioon  $A''B''$  muutub sellel pööramisel, kuid et punkti

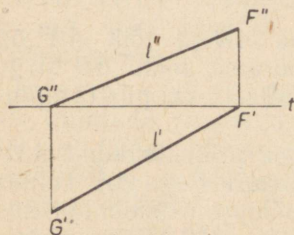
$B$  kaugus põhitasapinnast jääb endiseks, siis jääb endiseks ka punkti  $B''$  kaugus teljest  $t$ . Siit selgub, et punkt  $B''$  liigub mööda telje  $t$  paralleeli. Õeldust järeldub, et epüüril võib saada lõigu  $AB$  projektioonid pärast pöörämist püst-



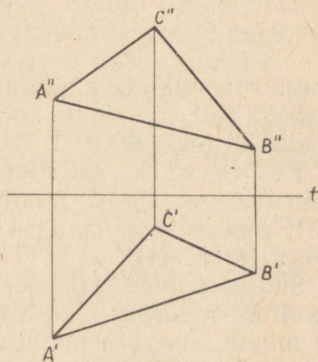
Joon. 65.

sirge  $AA'$  ümber järgmise konstruktsiooni abil (joon. 65): joonestame raadiusega  $A'B'$  ringjoone kaare keskpunktiga punktis  $A'$  ja leiame selle kaare lõikepunkti  $B'_1$  telje  $t$  paralleelsirgega, mis läbib punkti  $A'$ ; läbi  $B''$  joonestame teljega  $t$  paralleelse sirge lõikumiseni punkti  $B'_1$  läbiva telje  $t$  rist-sirgega punktis  $B''_1$ . Lõigud  $A'B'_1$  ja  $A''B''_1$  ongi lõigu  $AB$  projektioonid pärast pöörämist. Tema püstprojektioon  $A''B''_1$  on seejuures lõigu  $AB$  tõeliseks pikku-seks.

**61. Ülesanne 2.** Epüüril on antud sirge projektioonid  $l'$  ja  $l''$  (joon. 66). Leida selle sirge lõikepunktid projektioonitasapindadega (neid lõikepunkte nimetatakse sirgjoone jälgedeks projektioonitasapindadel).



Joon. 66.



Joon. 67.

Lahendus. Antud sirge ja püsttasapinna lõikepunkti põhiprojektioon asetseb teljel  $t$ . Teiselt poolt selle punkti põhiprojektioon peab asetsema sirgel  $l'$ . Seega sirge jälge

saamiseks püsttasapinnal pikendame tema põhiprojekt-siooni  $l'$  lõikumiseni teljega  $t$  punktis  $F'$ .

Punkt  $F'$  on otsitava jälje põhiprojektsioon. Et leida tema püstprojektsiooni, võtame punktist  $F'$  telje  $t$  ristsirge lõikumiseni sirgega  $l''$  punktis  $F''$ . Punkt  $F''$  ongi jälje püstprojektsiooniks, ilmselt ühtib ta jälje endaga. Samal teel leiame ka jälje põhitasapinnal: pikendame sirget  $l''$  lõikumiseni teljega  $t$  punktis  $G''$ , punktist  $G''$  võtame telje  $t$  ristsirge lõikumiseni sirgega  $l'$  punktis  $G'$ ; punkt  $G'$  ongi nõutud jälg põhitasapinnal.

**62. Kolmnurga projektsioonid.** Kui ruumis on antud kolmnurk, siis võib ehitada tema tippude ja külgede põhi- ja püstprojektsioonid. Niiviisi tekib joonisel kaks kolmnurka, mis on ruumis antud kolmnurga põhi- ja püstprojektsioonideks.

Kui kolmnurga kuju ja asend ruumis ei ole ette määratud, siis võib tema tippude projektsioone anda vabalt, silmas pidades ainult tingimust, et ühe ja sama tipu põhi- ja püstprojektsioon asetseksid telje  $t$  ristsirgel. Tõepoolest, tasapinna asend ruumis on täiesti määratud tema kolme punkti asukohaga, mida võib ruumis võtta täiesti vabalt, ainult mitte ühel ja samal sirgel.

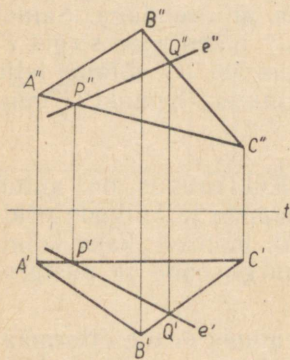
Joonisel 67 on esitatud mingi kolmnurga  $ABC$  projektsioonid. Kasutades neid projektsioone võib kolmnurga asendi kohta ruumis lahendada mitmesuguseid ülesandeid.

**63. Ülesanne 1.** *On antud kolmnurga projektsioonid  $A'B'C'$  ja  $A''B''C''$  (joon. 68). Ehitada epüüril niisuguse sirge püstprojektsioon, mis asetseb selle kolmnurga tasapinnas ja mille põhiprojektsioon on antud.*

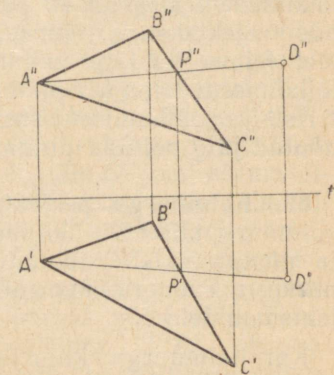
Lahendus. Olgu  $e'$  sirge põhiprojektsioon, ta lõikub sirgetega  $A'C'$  ja  $B'C'$  vastavalt punktides  $P'$  ja  $Q'$ .

Et see sirge asetseb kolmnurga  $ABC$  tasapinnas, siis lõikub ta külgedega  $AC$  ja  $BC$  nendes punktides, mille põhiprojektsioonideks on  $P'$  ja  $Q'$ . Nendesamade punktide püstprojektsioonide saamiseks tuleb punktide  $P'$  ja  $Q'$  joonestada teljele  $t$  ristsirged lõikumiseni vastavalt sirgetega  $A''C''$  ja  $B''C''$  punktides  $P''$  ja  $Q''$ . Sirge  $P''Q''$  on kolmnurga  $ABC$  tasapinnas asetseva otsitava sirge püstprojektsioon.

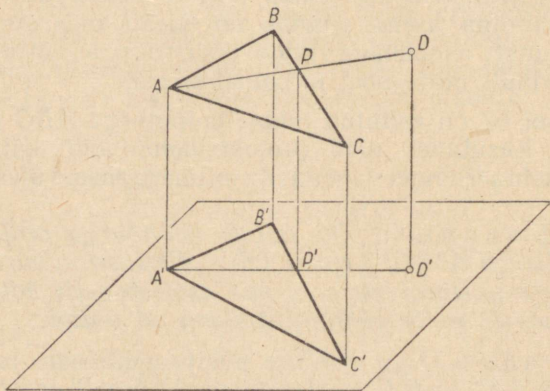
64. Ülesanne 2. Epüüril on antud kolmnurga  $ABC$  projektioonid  $A'B'C'$  ja  $A''B''C''$  (joon. 69). Peale selle on antud kolmnurga tasapinnas asetseva punkti  $D$  põhiprojektioon  $D'$ . Ehitada selle punkti püstprojektioon.



Joon. 68.



Joon. 69.

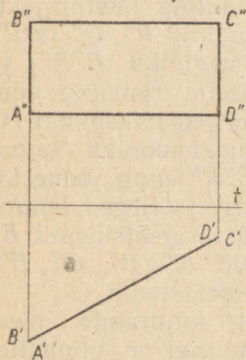


Joon. 70.

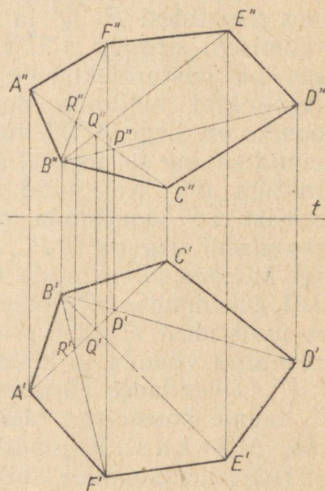
Lahendus. Ühendades omavahel punktid  $D'$  ja  $A'$ , saame kolmnurga  $ABC$  tasapinnas asetseva ning punkte  $D$  ja  $A$  ühendava sirglõigu põhiprojektiooni  $A'D'$  (joon. 70). Punkt  $P'$ , milles sirge  $A'D'$  lõikub sirgega  $B'C'$ , on sirge  $AD$  ja külje  $BC$  lõikepunkti  $P$  põhiprojektioon (joon. 70).

Joonestades punktist  $P'$  teljele ristsirge, leiame sirgel  $B''C''$  selle punkti püstprojektsiooni  $P''$ . Siis joonestame sirge  $A''P''$  ja sellel leiame endisel viisil otsitava punkti  $D$  püstprojektsiooni  $D''$  (joon. 69).

**65. Hulknurga projektsioonid.** Hulknurga projektsioonide ehitamisel ei saa tippude projektsioone enam vabalt võtta. Kui hulknurga tippude põhiprojektsioonid võtta vabalt, siis nende püstprojektsioonidest võib võtta vabalt (muidugi ühel ja samal ristjoonel vastava põhiprojektsiooniga) ainult kolm. Tõepoolest need kolm püstprojektsiooni koos põhiprojektsioonidega määravad täielikult selle tasapinna, milles asetseb hulknurk.



Joon. 71.



Joon. 72.

Seepärast tuleb teiste tippude püstprojektsioonid võtta nii, et nad oleksid selles tasapinnas asetsevate punktide projektsioonideks. Joonisel 71 on antud epüür põhitasapinna risttasapinnas olevast ristkülikust, mille kaks külge on risti põhitasapinnaga. Joonisel 72 on näidatud kuusnurga projektsioonide ehitamine, kusjuures tema tippude põhiprojektsioonid  $A', B', C', D', E', F'$  on võetud vabalt.

Püstprojektsioonid  $A'', B'', C''$  on võetud projektsioonitelje ristsirgetel, mis läbivad punkte  $A', B', C'$ . Seejuures

punkti  $A''$  võib punkti  $A'$  läbival telje ristsirgel võtta kus tahes, punkti  $B''$  võib punkti  $B'$  läbival telje ristsirgel võtta kus tahes ning punkti  $C''$  võib võtta punkti  $C'$  läbival telje ristsirgel kus tahes. Teiste tippude püstprojektsioonid võivad ehitada § 64 näidatud võtte abil. Ühendades üksteisega punktid  $A'$ ,  $B'$  ja  $C'$ , saame kuusnurga kahe külje põhi-projektsioonid ( $A'B'$  ja  $B'C'$ ) ning ühe diagonaali põhi-projektsiooni ( $A'C'$ ). Ühendades üksteisega punktid  $A''$ ,  $B''$  ja  $C''$ , saame nendesamade külgede ja sama diagonaali püstprojektsioonid ( $A''B''$ ,  $B''C''$  ja  $A''C''$ ). Seejärel ühendame punkti  $B'$  teiste tippude põhi-projektsioonidega  $D'$ ,  $E'$  ja  $F'$ . Sirgete  $B'D'$ ,  $B'E'$  ja  $B'F'$  lõikepunktid sirgega  $A'C'$  tähistame vastavalt tähtedega  $P'$ ,  $Q'$  ja  $R'$ . Joonestades punktide  $P'$ ,  $Q'$  ja  $R'$  projektsiooniteljele ristsirged lõikumiseni sirgega  $A''C''$ , saame punktid  $P''$ ,  $Q''$  ja  $R''$ . Need on püstprojektsioonis kuusnurga kolme diagonaali lõikepunktid neljanda diagonaali, mille püstprojektsiooniks on sirge  $A''C''$ . Nende diagonaalide püstprojektsioonid saame sel teel, et ühendame punktid  $P''$ ,  $Q''$  ja  $R''$  punktiga  $B''$ . Kui nüüd pikendada sirglõiku  $B''P''$  ja punktist  $D'$  joonestada projektsioonitelje ristsirge kuni lõikumiseni sirgega  $B''P''$ , siis nende sirgete lõikepunkt  $D''$  ongi kuusnurga neljanda tipu püstprojektsiooniks. Samal viisil, pikendades sirglõike  $B''Q''$  ja  $B''R''$  ning joonestades punktide  $E'$  ja  $F'$  projektsioonitelje ristsirged, leiame kuusnurga viienda ja kuuenda tipu püstprojektsioonid  $E''$  ja  $F''$ . Ühendades järgemööda punktid  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ ,  $E''$ ,  $F''$ , saame kuusnurga otsitava püstprojektsiooni.

66. Märkus. Kujundite ja kehade kujutamise meetod ristprojektsioonide abil kahel tasapinnal on viimistleitud prantsuse matemaatiku Gaspard Monge'i [l.: *gaspa'r mon(g)ž*] (1746—1818) poolt. Gaspard Monge oli XVIII sajandi lõpul ja XIX sajandi alguses suurim prantsuse matemaatik. Prantsuse revolutsiooni ajal oli tema konvendi poolt loodud kuulsas École polytechnique'i asutajaid. Monge'i meetod on käesoleval ajal üks põhilisemaid selles geomeetria osas, mis käsitleb geomeetriliste kehade kujutamiseviise tasapinnal ja mida nimetatakse **kujutavaks geomeetriaks**. Monge'i meetodit rakendatakse laialdaselt tehnikas ehituste projektide, hoonete plaanide, masinate osade ja detailide joonestamisel jne.

Selle meetodiga teostatakse joonisel konstruktsioone mõnikord keeruliste reeglite järgi, mida võib kasutada

ainult hästi omandades stereomeetria tõesid ja lauseid. Seepärast kasutatakse geomeetria õpikutes, nagu ka käesolevas raamatus, geomeetriliste kujundite ja kehade kujutamisel lihtsustatud jooniseid.

Need joonised on uuritavate kujundite projektsioonid, kuid mitte kahel, vaid ühel tasapinnal, nimelt joonise tasapinnal.

Nagu kõigest eelnenust järeldub, ei määra üks säärane projektsioon veel ei kujundi asendit ruumis ega ka tema täpseid mõõtmeid, kuid ta annab selge ülevaate uuritava kujundi kujust. Sellest ülevaatest piisab, et, tuginedes stereomeetria üldistele teoreemidele, tundma õppida geomeetriliste kujundite ja kehade omadusi.

## Kolmas peatükk.

### HULKTAHUKAD.

#### I. RÖÖPTAHUKAS JA PÜRAMIID.

**67. Hulktahukas.** Hulktahukaks nimetatakse tasaste hulknurkadega piiratud keha. Nende hulknurkade külgi nimetatakse **hulktahuka servadeks**. Hulktahukat piiravaid hulknurki nimetatakse tema **tahkudeks**. Ühte punkti koonduvad hulktahuka tahud moodustavad mitmetahulise nurga; sääraseite mitmetahuliste nurkade tippu nimetatakse **hulktahuka tippudeks**. Sirglõike, mis ühendavad mitte ühel tahul asetsevad tippu, nimetatakse hulktahuka **diagonaalideks**.

Meie käsitleme ainult kumeraid hulktahukaid, s. o. sääraseid, mis tervenisti asetsevad ühel pool iga tema tahu tasapinda.

Hulktahuka väikseim tahkude arv on neli; niisugune hulktahukas tekib kolmetahulise nurga lõikamisel mingi tasapinnaga.

**68. Prisma.** Prismaks nimetatakse niisugust hulktahukat, mille kaks tahku on võrdsete ja vastavalt paralleelsete külgedega hulknurgad ning kõik teised tahud on rööpkülilikud.

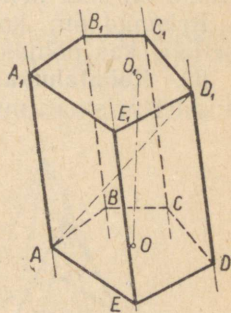
Selleks et näidata, et niisugune hulktahukas on võimalik, võtame mingi hulknurga  $ABCDE$  (joon. 73) ja ehitame tema tippudest läbi rea väljaspool tema tasapinda asetsevad paralleelsed sirgeid.

Võtnud seejärel ühel paralleelsel sirgel vabalt punkti  $A_1$ , paneme läbi selle punkti tasapinnaga  $ABCDE$  paralleelse tasapinna; läbi iga kõrvuti asetsevate paralleelsete sirgete paari paigutame samuti tasapinnad. Kõik need tasapinnad määravad lõikumisel hulktahuka  $ABCDEA_1B_1C_1D_1E_1$ , mis vastab prisma definitsioonile. Tõepoolest, paralleelsed

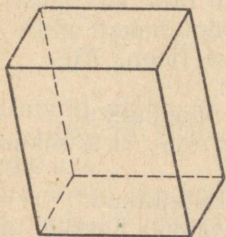
tasapinnad  $ABCDE$  ja  $A_1B_1C_1D_1E_1$  lõikuvad külgtasapindadega mööda paralleelseid sirgeid (§ 16); seepärast nelinurgad  $AA_1E_1E$ ,  $EE_1D_1D$  jne. on rööpküklikud. Teiselt poolt on hulknurkade  $ABCDE$  ja  $A_1B_1C_1D_1E_1$  küljed vastavalt võrdsed (kui rööpküklikute vastasküljed) ja nende nurgad on vastavalt võrdsed (kui paralleelsete ja samasuunaliste haaradega nurgad); seega need hulknurgad on kongruentsed.

Paralleelsetes tasapindades asetsevaid hulknurki  $ABCDE$  ja  $A_1B_1C_1D_1E_1$  nimetatakse prisma **põhjadeks**, ühe põhja mingist punktist teisele põhjale ehitatud ristlõiku  $OO_1$  nimetatakse prisma **kõrguseks**. Rööpküklikuid  $AA_1B_1B$ ,  $BB_1C_1C$  jne. nimetatakse prisma **külgtahkudeks** ja nende külgi  $AA_1$ ,  $BB_1$  jne., mis ühendavad põhjade vastavaid tippe, nimetatakse **külgservadeks**. Prisma kõik külgservad on võrdsed kui paralleelsete sirgete lõigud paralleelsete tasapindade vahel.

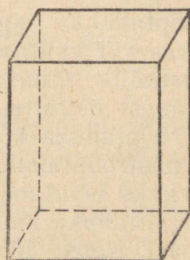
Mitte ühel tahul asetsevat kahte tippu ühendavat sirglõiku nimetatakse prisma diagonaaliks. Säärane on näiteks sirglõik  $AD_1$  (joon. 73).



Joon. 73.



Joon. 74



Joon. 75.

Kahte mitte ühele tahule kuuluvat külgserva (näiteks servi  $AA_1$  ja  $CC_1$ , joon. 73) läbivat tasapinda nimetatakse **diagonaaltasapinnaks**.

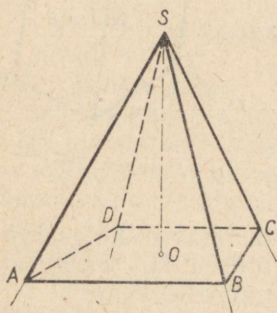
Prismat nimetatakse kas **püstprismaks** või **kaldprismaks** vastavalt sellele, kas tema külgservad on põhjadega

risti või kaldu. Püstprisma külgtahud on ristkülikud. Püstprisma kõrguseks võib lugeda tema külgserva.

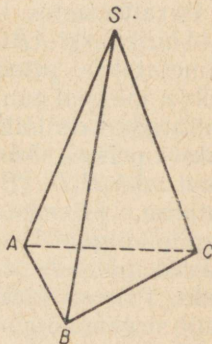
Püstprismat nimetatakse **korrapäraseks**, kui tema põhjad on korrapärased hulknurgad. Säärase prisma külgtahud on kõik kongruentsed ristkülikud.

Prismad on: kolmnurksed, nelinurksed jne. vastavalt sellele, kas põhjaks on kolmnurk, nelinurk jne.

**69. Rööptahukas.** Rööptahukas nimetatakse niisugust prismat, mille põhjadeks on rööpkülikud (joon. 74).



Joon. 76.



Joon. 77.

Rööptahukas nagu iga prisma võib olla kas püströöptahukas või kaldrööptahukas. Püströöptahukat, mille põhi on ristkülik, nimetatakse risttahukaks (joon. 75).

Nendest definitsioonidest järeldub:

- 1) rööptahuka kõik kuus tahku on rööpkülikud;
- 2) püströöptahuka neli külgtahku on ristkülikud ja kaks põhitahku on rööpkülikud;
- 3) risttahuka kõik kuus tahku on ristkülikud.

Ühest tipust lähtuvat kolme risttahuka serva nimetatakse tema mõõtmeteks, ühte neist võib vaadelda pikkusena, teist — laiusena ja kolmandat — kõrgusena.

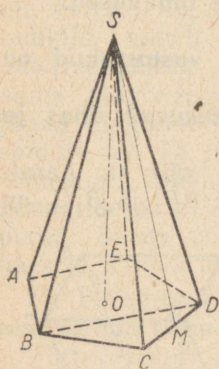
Võrdsete mõõtmetega risttahukat nimetatakse **kuubiks**. Kuubi kõik tahud on ruudud.

**70. Püramiid.** Püramiidiks nimetatakse niisugust hulttahukat, mille üks — põhjaks nimetatav — tahk on hulknurk ja kõik teised — külgtahkudeks nimetatavad — tahud on ühise tipuga kolmnurgad.

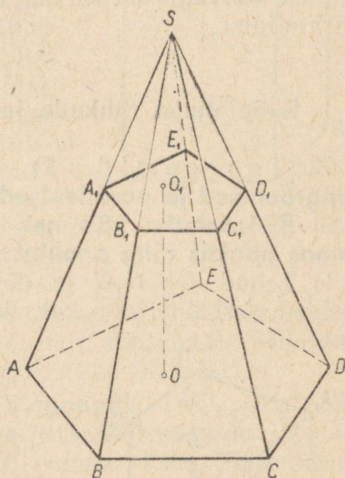
Püramiidi saamiseks võib mingi mitmetahuline nurk  $S$  läbi lõigata vabalt võetud tasapinnaga  $ABCD$  (joon. 76) ja võtta äralõigatud osa  $SABCD$ .

Külgnurkade ühist tippu  $S$  nimetatakse püramiidi **tipuks** ja tipust põhitasapinnale ehitatud ristlõiku nimetatakse tema **kõrguseks**.

Harilikult, püramiidi tähtedega tähistades, kirjutatakse esikohale see täht, mis on tipu tähiseks, näiteks  $SABCD$  (joon. 76).



Joon. 78.



Joon. 79.

Püramiid tippu ja põhja mingit diagonaali (näiteks  $BD$  joonisel 78) läbivat tasapinda nimetatakse **diagonaal-tasapinnaks**.

Püramiidid on: kolmnurksed, nelinurksed jne. vastavalt sellele, mis on põhjaks, kas kolmnurk, nelinurk jne. Kolmnurkset püramiidi (joon. 77) nimetatakse **nelitahukaks** ehk **tetraeedriks**; tetraeedri kõik neli tahku on kolmnurgad.

Püramiidi nimetatakse **korrapäraseks** (joon. 78), kui tema põhjaks on korrapärane hulknurk ja tema kõrguse aluspunktiks on selle hulknurga keskpunkt. Korrapärase püramiidi külgservad on kõik võrdsed (kui võrdsete projektsioonidega kaldlõigud). Seepärast on korrapärase püramiidi kõik külgtahud kongruentsed võrdhaarsed kolm-

nurgad. Iga niisuguse kolmnurga kõrgust  $SM$  (joon. 78) nimetatakse püramiidi **apoteemiks**. Korrapärase püramiidi apoteemid on võrdsed.

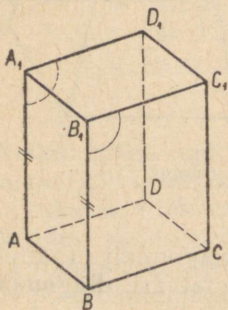
71. **Tüvipüramiid**. Põhja ( $ABCDE$ ) ja põhjaga paralleelse lõiketasapinna ( $A_1B_1C_1D_1E_1$ ) vahelist püramiidi osa nimetatakse **tüvipüramiidiks** (joon. 79). Paralleelseid tahke nimetatakse tüvipüramiidi **põhjadeks**, põhja  $A_1B_1C_1D_1E_1$  mingist punktist  $O_1$  teise põhjani ehitatud ristlõiku  $OO_1$  nimetatakse tüvipüramiidi **kõrguseks**. Tüvipüramiidi nimetatakse **korrapäraseks**, kui ta moodustab osa korrapärasest püramiidist.

### Rööptahuka tahkude ja diagonaalide omadused.

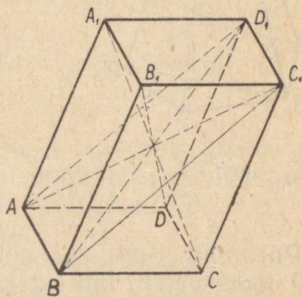
72. Teoreemid. 1) **Rööptahuka vastastahud on kongruentsed ja paralleelsed.**

2) **Rööptahuka kõik neli diagonaali lõikuvad ühes ja samas punktis ning poolitavad üksteist.**

1) Tahud  $BB_1C_1C$  ja  $AA_1D_1D$  (joon. 80) on paralleelsed, sest ühele tahule kaks lõikuvat sirget  $BB_1$  ja  $B_1C_1$  on



Joon. 80.



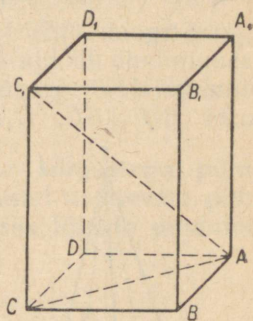
Joon. 81.

paralleelsed teisele tahule kahe lõikuva sirgega  $AA_1$  ja  $A_1D_1$  (§ 15); need tahud on kongruentsed, sest  $B_1C_1 = A_1D_1$ ,  $B_1B = A_1A$  (kui rööpkülükute vastasküljed) ja

$$\angle BB_1C_1 = \angle AA_1D_1.$$

2) Võtame mingid kaks diagonaali (joon. 81), näiteks diagonaalid  $AC_1$  ja  $BD_1$ , ning abisirged  $AD_1$  ja  $BC_1$ . Et

servad  $AB$  ja  $D_1C_1$  on vastavalt paralleelsed ja võrdsed servaga  $DC$ , siis nad on paralleelsed ja võrdsed ka teineteisega; seega nelinurk  $AD_1C_1B$  on rööpkülik, milles lõigud  $AC_1$  ja  $BD_1$  on diagonaalideks, rööpküliku diagonaalid aga poolitavad teineteist. Võtame nüüd ühe nendest diagonaalidest, näiteks diagonaali  $AC_1$  koos kolmanda diagonaaliga, ütleme diagonaaliga  $B_1D$ . Täpselt samal viisil võime tõestada, et nad poolitavad teineteist lõikepunktis. Järelikult diagonaalid  $B_1D$  ja  $AC_1$  ning diagonaalid  $AC_1$  ja  $BD_1$  (mis võtsime varem) lõikuvad ühes ja samas punktis, nimelt diagonaali  $AC_1$  poolituspunktis. Võttes lõpuks sama diagonaali  $AC_1$  koos neljanda diagonaaliga  $A_1C$ , tõestame samuti, et ka nemad poolitavad teineteist. Tähendab ka selle diagonaalide paari lõikepunktiks on diagonaali  $AC_1$  poolituspunkt. Seega rööptahuka kõik neli diagonaali lõikuvad ühes ja samas punktis ning poolitavad üksteist.



Joon. 82.

**73. Teoreem. Risttahuka diagonaali ( $AC_1$ , joon. 82) ruut võrdub tema kolme mõõtme ruutude summaga.**

Võttes põhja diagonaali  $AC$ , saame kaks kolmnurka:  $AC_1C$  ja  $ACB$ . Nad mõlemad on täisnurksed; esimene seepärast, et risttahukas on püstprisma, seega  $CC_1$  on põhjaga risti; teine seepärast, et risttahuka põhi on ristkülik. Nendest kolmnurkadest leiame, et

$$AC_1^2 = AC^2 + CC_1^2 \text{ ja } AC^2 = AB^2 + BC^2.$$

Seega

$$AC_1^2 = AB^2 + BC^2 + CC_1^2 = AB^2 + AD^2 + AA_1^2.$$

**Järeldus.** Risttahuka diagonaalid on võrdsed.

**Püramiidi paralleelsete lõigete omadused.**

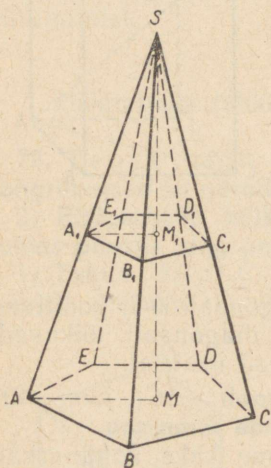
**74. Teoreemid. Kui püramiid (joon. 83) on lõigatud põhjaga paralleelse tasapinnaga, siis**

1) see tasapind jaotab külgservad ja kõrguse võrdelis-  
teks osadeks;

2) lõige on põhjaga sarnane hulknurk;

3) lõike pindala ja põhja pindala suhtuvad nagu vasta-  
vate püramiidide kõrguste ruudud.

1) Sirgeid  $A_1B_1$  ja  $AB$  võib vaadelda kui paralleelsete  
tasapindade (põhja ja lõikaja) lõikejooni kolmanda tasa-  
pinnaga  $ASB$ ; seepärast  $A_1B_1 \parallel AB$  (§ 16). Selsamal põh-  
jusel  $B_1C_1 \parallel BC$ ,  $C_1D_1 \parallel CD$ , ... ja  $A_1M_1 \parallel AM$ ; seepärast



Joon. 83.

$$\frac{SA_1}{A_1A} = \frac{SB_1}{B_1B} = \frac{SC_1}{C_1C} = \dots = \frac{SM_1}{M_1M}.$$

2) Kolmnurkade  $ASB$  ja  $A_1SB_1$ ,  
kolmnurkade  $BSC$  ja  $B_1SC_1$  jne.  
sarnasusest järeldame, et

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BS}{B_1S}; \quad \frac{BS}{B_1S} = \frac{BC}{B_1C_1},$$

millest saame, et

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BC}{B_1C_1}.$$

Samuti saame, et

$$\frac{BC}{B_1C_1} = \frac{CS}{C_1S}; \quad \frac{CS}{C_1S} = \frac{CD}{C_1D_1},$$

millest järeldub, et

$$\frac{BC}{B_1C_1} = \frac{CD}{C_1D_1}.$$

Samal viisil tõestame hulknurkade  $ABCDE$  ja  
 $A_1B_1C_1D_1E_1$  teiste külgede võrdelisuse. Et peale selle  
nende hulknurkade vastavad nurgad on võrdsed (sest  
nende haarad on paralleelsed ja samasuunalised), siis on  
nad sarnased.

3) Sarnaste hulknurkade pindalad suhtuvad nagu  
vastavate külgede ruudud; seepärast

$$\frac{\text{pindala } ABCDE}{\text{pindala } A_1B_1C_1D_1E_1} = \frac{AB^2}{A_1B_1^2} = \left( \frac{AB}{A_1B_1} \right)^2.$$

Kuid

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AS}{A_1S} = \frac{MS}{M_1S}.$$

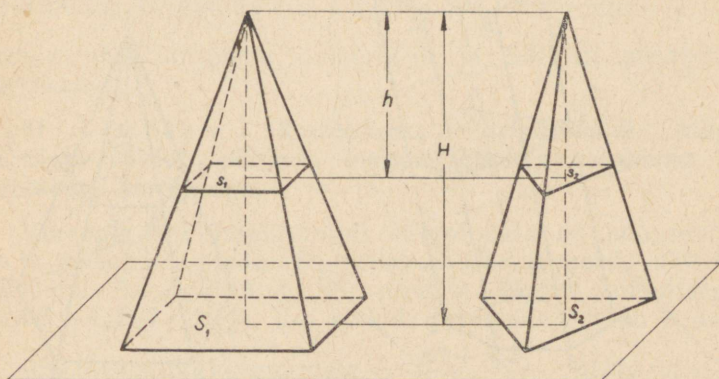
Tähendab

$$\frac{\text{pindala } ABCDE}{\text{pindala } A_1B_1C_1D_1E_1} = \left(\frac{MS}{M_1S}\right)^2 = \frac{MS^2}{M_1S^2}.$$

75. Järeldus. Korrapärase tüvipüramiidi ülemine põhi on korrapärane hulknurk ning külgtahud on kongruentsed ja võrdhaarsed trapetsid (joon. 83).

Iga säärase trapetsi kõrgust nimetatakse korrapärase tüvipüramiidi apoteemiks.

76. Teoreem. Kui kahte võrdsete kõrgustega püramiidi lõigata tippudest võrdsetel kaugustel asetsevate põhjadega paralleelsete tasapindadega, siis lõigete pindalad on võrdelised põhjade pindaladega.



Joon. 84.

Olgu  $S_1$  ja  $S_2$  (joon. 84) kahe püramiidi põhjade pindalad, kummagi kõrgus olgu  $H$ ;  $s_1$  ja  $s_2$  olgu tippudest ühel ja samal kaugusel  $h$  asetsevate põhjadega paralleelsete lõigete pindalad.

Eelmise teoreemi põhjal saame:

$$\frac{s_1}{S_1} = \frac{h^2}{H^2} \text{ ja } \frac{s_2}{S_2} = \frac{h^2}{H^2},$$

millest järeldub, et

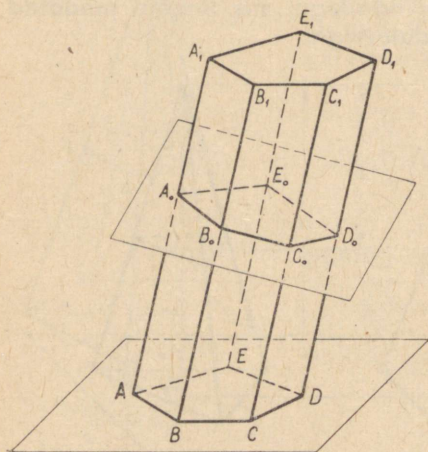
$$\frac{s_1}{S_1} = \frac{s_2}{S_2} \text{ ehk } \frac{s_1}{s_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

77. Järeldus. Kui  $S_1 = S_2$ , siis ka  $s_1 = s_2$ , s. o. kui võrdsete kõrgustega püramiidide põhjad on pindvõrdsed, siis on pindvõrdsed ka nende tippudest võrdsetel kaugustel asetsevad põhjadega paralleelsed lõiked.

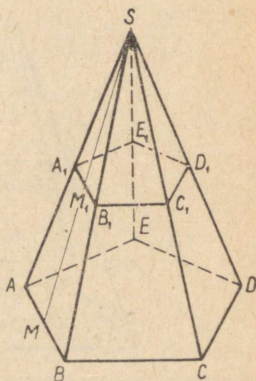
### Prisma ja püramiidi külgpindala.

78. Teoreem. Prisma külgpindala võrdub tema ristlõike übermõõdu ja külgserva korrutisega.

Ristlõikeks (joon. 85) nimetatakse hulknurka  $A_0B_0C_0D_0E_0$ ,



Joon. 85.



Joon. 86.

mis tekib prisma lõikamisel külgservadega ristuva tasapinnaga. Selle hulknurga küljed on risti prisma külgservadega (§ 24).

Prisma külgpindala on rööpkülikute pindalade summa; iga rööpküliku aluseks võib võtta siin külgserva ning kõrguseks — ristlõike külje. Seega

$$\begin{aligned} \text{prisma külgpindala} &= AA_1 \cdot A_0B_0 + BB_1 \cdot B_0C_0 + \\ &+ CC_1 \cdot C_0D_0 + DD_1 \cdot D_0E_0 + EE_1 \cdot E_0A_0 = (A_0B_0 + \\ &+ B_0C_0 + C_0D_0 + D_0E_0 + E_0A_0) \cdot AA_1. \end{aligned}$$

79. Järeldus. Püstprisma külgpindala võrdub põhja übermõõdu ja kõrguse korrutisega, sest püstprisma ristlõikeks võib võtta põhja enda ja tema külgserv on võrdne kõrgusega.

80. Teoreem. Korrapärase püramiidi külgpindala võrdub põhja übermõõdu ja püramiidi apoteemi poole korrutisega.

Olgu (joon. 86)  $SABCDE$  korrapärane püramiid ning  $SM$  tema apoteem. Selle püramiidi külgpindala on kongruentsete võrdhaarsete kolmnurkade pindalade summa. Ühe kolmnurga, näiteks kolmnurga  $ASB$  pindala on võrdne korrutisega  $\frac{1}{2} \cdot AB \cdot SM$ . Kui kõikide kolmnurkade arv on  $n$ , siis:

$$\text{püramiidi külgpindala} = \frac{1}{2} \cdot AB \cdot SM \cdot n = \frac{n \cdot AB \cdot SM}{2},$$

kus  $n \cdot AB$  on põhja übermõõt ja  $SM$  on püramiidi apoteem.

81. Teoreem. Korrapärase tüvipüramiidi külgpindala võrdub põhjade übermõõtude poolsumma ja apoteemi korrutisega.

Korrapärase tüvipüramiidi külgpindala on kongruentsete trapetsite pindalade summa. Ühe trapetsi, näiteks trapetsi  $AA_1B_1B$  (joon. 86) pindala võrdub korrutisega  $\frac{1}{2}(AB + A_1B_1) \cdot MM_1$ . Kui kõikide trapetsite arv on  $n$ , siis

$$\begin{aligned} \text{tüvipüramiidi külgpindala} &= \frac{AB + A_1B_1}{2} \cdot MM_1 \cdot n = \\ &= \frac{n \cdot AB + n \cdot A_1B_1}{2} \cdot MM_1, \end{aligned}$$

kus  $n \cdot AB$  ja  $n \cdot A_1B_1$  on põhjade übermõõdud.

#### HARJUTUSI.

1. Korrapärase kolmnurkse püstprisma kõrgus on 12 m ja põhiserv on 3 m. Arvutada prisma täispindala.

2. Risttahuka täispindala on 1714 m<sup>2</sup> ning põhja lähisservade pikkused on 25 m ja 14 m. Arvutada külgpindala ja külgserv.

3. Ruudukujulise põhjaga risttahukas, mille kõrgus on  $h$ , on lõigatud tasapinnaga, mis läbib kahte vastaskülgserva. Avaldada risttahuka täispindala, teades, et lõike pindala on  $S$ .

4. Korrapärase kuusnurkse püramiidi põhiserv on  $a$  ja kõrgus  $h$ . Avaldada külgserv, apoteem, külgpindala ja täispindala.

5. Avaldada kolmnurkse püramiidi täispindala ja kõrgus, kui iga tema serv on  $a$ .

6. Korrapärane kuusnurkne püramiid, mille kõrgus on 25 cm ja põhiserv 5 cm, on lõigatud põhjaga paralleelse tasapinnaga. Arvutata selle tasapinna kaugus püramiidi tipust, teades, et lõike pindala on  $\frac{2}{3}\sqrt{3}\text{ cm}^2$ .

7. Ruudukujulise põhjaga tüvipüramiidi kõrgus on  $h$ , alumise põhja serv on  $a$  ja ülemise põhja serv on  $b$ . Avaldada tüvipüramiidi täispindala.

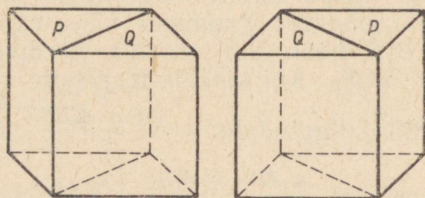
8. Tüvipüramiidi kõrgus on 6 ja põhjade pindalad on 18 ning 8. See tüvipüramiid on lõigatud põhjadega paralleelse tasapinnaga, mis poolitab kõrguse. Arvutada lõike pindala.

## II. PRISMA JA PÜRAMIIDI RUUMALA.

82. Põhilauseid ruumalade kohta. Geomeetrilise keha pinnaga piiratud ruumiosa suurust nimetatakse selle keha **ruumalaks**.

Meie seame endale ülesandeks avaldada see suurus arvu abil, mis mõõdab seda suurust. Seejuures peame silmas järgmisi põhilauseid.

1) *Kongruentsete kehade ruumalad on võrdsed.*



Joon. 87.

2) *Osadest ( $P$  ja  $Q$ ) koosneva keha ruumala (näiteks kummalgi joonisel 87 kujutatud rööptahuka ruumala) võrdub nende osade ruumalade summaga.*

*Võrdsete ruumaladega kehasid nimetatakse ruumvõrdseteks.*

83. **Ruumalaühik.** Ruumalade mõõtmisel võetakse ühikuks niisuguse kuubi ruumala, mille iga serv võrdub pikkusühikuga. Nii on ruumalaühikutena tarvitusel kuupmeeter ( $\text{m}^3$ ), kuupsentimeeter ( $\text{cm}^3$ ) jne.

## Rööptahuka ruumala.

84. Teoreem. Risttahuka ruumala võrdub tema kolme mõõtme korrutisega.

Selles lühikeses lauses väljendatud teoreemi tuleb mõista nii: risttahuka ruumala mõõtari võrdub tema kolme mõõtme mõõtari korrutisega, kui risttahuka kolm lähiserva on mõõdetud pikkusühikuga, mis võrdub ruumalaühikuks võetud kuubi servaga. Nii et kui  $x$  on arv, mis väljendab risttahuka ruumala kuupsentimeetrites, ning  $a$ ,  $b$  ja  $c$  on arvud, mis väljendavad tema kolme lähiserva pikkusi sentimeetrites, siis teoreem väidab, et  $x = abc$ .

Tõestamisel vaatleme eraldi kolme juhtu.

1) Mõõtmed väljenduvad täisarvudena.

Olgu mõõtmed näiteks järgmised (joon. 88):  $AB = a$ ,  $BC = b$  ja  $BD = c$ , kus  $a$ ,  $b$  ja  $c$  on täisarvud (näiteks meie joonisel  $a = 4$ ,  $b = 2$  ja  $c = 5$ ). Siis risttahuka põhi sisaldab  $ab$  niisugust ruutu, mis on vastavaks ruutühikuks. On ilmne, et igale ruudule võib paigutada ühe kuupühiku. Siis tekib kiht (nagu joonisel kujutatud), mis koosneb  $ab$  kuupühikust. Et selle kihi kõrgus võrdub ühe pikkusühikuga ja kogu risttahuka kõrgus on  $c$  pikkusühikut, siis risttahukasse võib paigutada  $c$  niisugust kihti. Seega selle risttahuka ruumala võrdub  $abc$  kuupühikuga.

2) Mõõtmed väljenduvad murdarvudena.

Olgu risttahuka mõõtmed järgmised:

$$\frac{m}{n}, \quad \frac{p}{q}, \quad \frac{r}{s}$$

(mõned neist murdudest võivad olla täisarvud).

Teisendades murrud ühenimelisteks, saame:

$$\frac{mqs}{nqs}, \quad \frac{pns}{nqs}, \quad \frac{rnq}{nqs}.$$

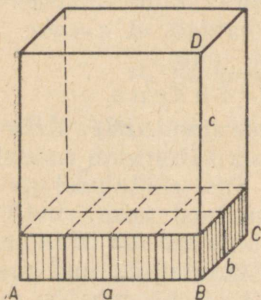
Võtame  $\frac{1}{nqs}$  osa pikkusühikust uueks (abi-) pikkusühikuks. Selle uue ühikuga mõõdetud risttahuka servi väljendavad siis täisarvud, ja nimelt:

$$mqs, \quad pns \quad \text{ja} \quad rnq$$

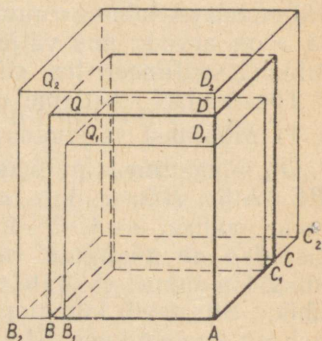
ning seega, nagu tõestatud (juhtum 1), risttahuka ruumala võrdub korrutisega  $(mqs) \cdot (pns) \cdot (rnq)$ , kui seda

ruumala mōõta uuele pikkusühikule vastava kuupühikuga. Endisele pikkusühikule vastav kuupühik sisaldab säära-seid uusi kuupühikuid  $(nqs)^3$  tükki; tähendab uus kuup-ühik moodustab  $\frac{1}{(nqs)^3}$  osa endisest. Seepärast endise kuup-ühikuga mōõdetud risttahuka ruumala on:

$$\frac{1}{(nqs)^3} \cdot (mqs) (pns) (rnq) = \frac{mqs}{nqs} \cdot \frac{pns}{nqs} \cdot \frac{rnq}{nqs} = \frac{m}{n} \cdot \frac{p}{q} \cdot \frac{r}{s}.$$



Joon. 88.



Joon. 89.

3) Mōõtmed väljenduvad irratsionaalarvudena.

Olgu antud risttahukal (joon. 89), mida lühiduse pärast tähis-tame ühe tähega Q, järgmised mōõtmed:

$$AB = \alpha; AC = \beta; AD = \gamma,$$

kus arvud  $\alpha, \beta$  ja  $\gamma$  või mõned neist on irratsionaalsed. Igähte arvu-dest  $\alpha, \beta$  ja  $\gamma$  võib väljendada lõpmatu kümnendmurru kujul. Võtame nende murdude ligikaudsed väärtused  $n$  kohaga murdosas-esityks puuduga, seejärel liiaga. Puuduga võetud väärtusi tähis-tame tähtedega  $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$  ja liiaga võetud väärtusi tähtedega  $\alpha'_n, \beta'_n, \gamma'_n$ . Paigutame servale  $AB$  punktist  $A$  kaks lõiku:  $AB_1 = \alpha_n$  ja  $AB_2 = \alpha'_n$ . Servale  $AC$  paigutame samast punktist  $A$  lõigud:  $AC_1 = \beta_n$  ja  $AC_2 = \beta'_n$  ning servale  $AD$  samast punktist lõigud  $AD_1 = \gamma_n$  ja  $AD_2 = \gamma'_n$ .

Seejuures on:

$$AB_1 < AB < AB_2; AC_1 < AC < AC_2; AD_1 < AD < AD_2.$$

Ehitame nüüd kaks abi-risttahukat: ühe mōõtmetega  $AB_1, AC_1$  ja  $AD_1$  (tähistame ta tähega  $Q_1$ ) ning teise mōõtmetega  $AB_2, AC_2$  ja

$AD_2$  (tähistame ta tähega  $Q_2$ ). Risttahukas  $Q_1$  on terveniisti risttahuka  $Q$  sees ning risttahukas  $Q_2$  sisaldab endas risttahukat  $Q$ .

Tõestatu põhjal (juhtum 2) on:

$$\text{ruumala } Q_1 = \alpha_n \beta_n \gamma_n, \quad (1)$$

$$\text{ruumala } Q_2 = \alpha'_n \beta'_n \gamma'_n, \quad (2)$$

kusjuures ruumala  $Q_1 <$  ruumala  $Q_2$ .

Hakkame nüüd suurendama arvu  $n$ . See tähendab, et võtame arvude  $\alpha$ ,  $\beta$  ja  $\gamma$  ligikaudsed väärtused järjest suurema täpsusega. Vaatame, kuidas muutuvad seejuures risttahukate  $Q_1$  ja  $Q_2$  ruumalad.

Arvu  $n$  piiramatul kasvamisel ruumala  $Q_1$  ilmselt suureneb ning võrduse (1) tõttu on tema piirväärtuseks korrutise  $(\alpha_n \beta_n \gamma_n)$  piirväärtus. Ruumala  $Q_2$  ilmselt kahaneb ning võrduse (2) tõttu tema piirväärtus on korrutise  $(\alpha'_n \beta'_n \gamma'_n)$  piirväärtus. Kuid algebrast on teada, et arvu  $n$  piiramatul kasvamisel on korrutistel  $\alpha_n \beta_n \gamma_n$  ja  $\alpha'_n \beta'_n \gamma'_n$  ühine piirväärtus, mis on irratsionaalarvude  $\alpha$ ,  $\beta$  ja  $\gamma$  korrutiseks.

Seda piirväärtust loemegi risttahuka  $Q$  ruumala mõõtarvuks; seega:

$$\text{ruumala } Q = \alpha\beta\gamma.$$

Võib tõestada, et säärasel viisil määratud ruumala rahuldab ruumalade kohta seatud nõudeid (§ 82). Tõepoolest, ruumala niisuguse definitiooni puhul on võrdsetel risttahukatel ilmselt võrdsed ruumalad. Seega esimene tingimus (§ 82) on täidetud. Jaotame nüüd antud risttahuka  $Q$  põhjaga paralleelse tasapinnaga kaheks:  $Q_1$  ja  $Q_2$  (joon. 90). Siis:

$$\text{ruumala } Q = AB \cdot AC \cdot AD;$$

$$\text{ruumala } Q_1 = AB \cdot AA_1 \cdot AD;$$

$$\text{ruumala } Q_2 = A_1B_1 \cdot A_1C \cdot A_1D_1.$$

Liites liikmeti kaks viimast võrdust ning pidades silmas, et  $A_1B_1 = AB$  ja  $A_1D_1 = AD$ , saame, et ruumala  $Q_1 +$  ruumala  $Q_2 = AB \cdot AA_1 \cdot AD +$

$$+ AB \cdot A_1C \cdot AD = AB \cdot AD (AA_1 + A_1C) = AB \cdot AD \cdot AC;$$

siit saame, et:

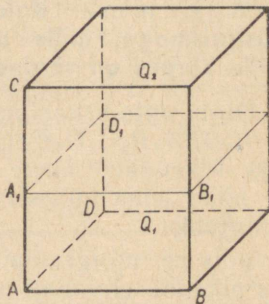
$$\text{ruumala } Q_1 + \text{ruumala } Q_2 = \text{ruumala } Q.$$

Seega ka teine tingimus (§ 82) on täidetud, kui risttahukas koostada kahest osast, mis tekkisid tema lõikamisel ühe tahuga paralleelse tasapinnaga.

**85. Järeldus.** Olgu risttahuka põhiservade mõõt- arvud  $a$  ja  $b$  ning olgu kolmanda mõõtme (kõrguse) mõõt- arv  $c$ . Siis, tähistades tema vastava kuupühikuga mõõde- tud ruumala tähega  $V$ , võime kirjutada:

$$V = abc.$$

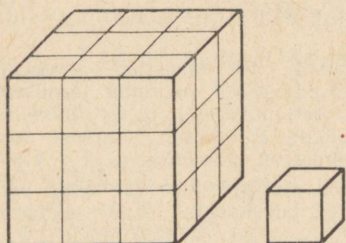
Et korrutis  $ab$  väljendab põhja pindala, siis võib öelda, et



Joon. 90.

**risttahuka ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega.**

Märkus. Kahe eri nimega kuupühiku suhe võrdub nende ühikkuupide servadeks olevate pikkusühikute suhte kolmanda astmega. Nii on kuupmeetri suhe kuupdetsimeetriga võrdne  $10^3$ , s. o. 1000.



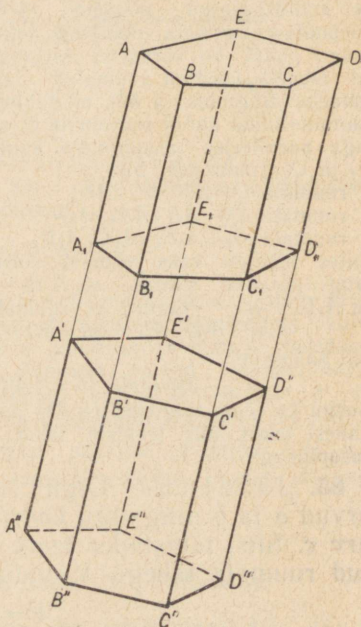
Joon. 91.

Seepärast, kui meil on näiteks kuup serva pikkusega  $a$  pikkusühikut ning teine kuup serva pikkusega  $3a$  pikkusühikut, siis nende ruumalade suhe on  $3^3$ , s. o. 27, mis on ilmselt näha joonisel 91.

**86. L e m m a. Kaldprisma on ruumvõrdne niisuguse püstprismaga, mille põhjaks on kaldprisma ristlõige ja mille kõrgus on võrdne kaldprisma külgservaga.**

Olgu antud kaldprisma  $ABCDEA_1B_1C_1D_1E_1$  (joon. 92). Pikendame ühe poole kõiki tema külgservi ja külgtahke.

Võtame mingi ühe serva pikendusel vabalt punkti  $A'$  ning läbi selle punkti ristlõike  $A'B'C'D'E'$ . Seejärel, paigutanud sellele servale punktist  $A'$  lõigu  $A'A''=AA_1$ , võtame läbi punkti  $A''$  ristlõike  $A''B''C''D''E''$ . Et nende ristlõigete tasapinnad on paralleelsed, siis  $B'B''=C'C''=D'D''=E'E''=A'A''=AA_1$  (§ 17). Seetõttu risttahukas  $A''D'$ , mille põhjades on need ristlõiked, on püstprisma, millest kõneldakse teoreemis.



Joon. 92.

Tõestame, et antud kaldprisma on ruumvõrdne selle püstprismaga. Selleks veendume esmalt, et hulktahukad  $A'D$  ja  $A''D_1$  on kongruentsed. Nende põhjad  $A'B'C'D'E'$  ja  $A''B''C''D''E''$  on kongruentsed kui ühe ja sama prisma  $A''D'$  põhjad; teiselt poolt, lisades võrduse  $A_1A = A''A'$  kummalegi poole ühe ja sama lõigu  $A_1A'$ , saame, et

$$A'A = A''A_1;$$

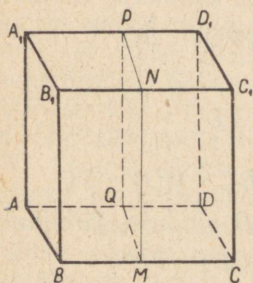
samal viisil saame, et

$$B'B = B''B_1,$$

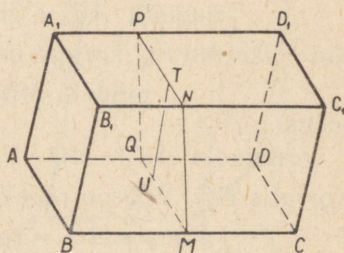
$$C'C = C''C_1$$

jne.

Kujutleme nüüd, et hulktahukas  $A'D$  on asetatud hulktahuka  $A''D_1$  sisse nii, et nende põhjad ühtivad; siis ühtivad ka nende külgservad, sest nad on risti põhjadega ja on vastavalt võrdsed; seetõttu hulktahukas  $A'D$  ühtib hulktahukaga  $A''D_1$ , tähendab need kehad on kongruentsed. Nüüd paneme tähele, et kui püstprismale  $A''D'$  lisame hulktahuka  $A'D$  ja kaldprismale  $A_1D$  lisame hulktahuka  $A''D_1$ , mis on ruumvõrdne kehaga  $A'D$ , siis saame ühe ja sama hulktahuka  $A''D$ . Sellest järeldub, et prismad  $A_1D$  ja  $A''D'$  on ruumvõrdsed.



Joon. 93.



Joon. 94.

### 87. Teoreem. Rööptahuka ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega.

Varem tõestasime selle teoreemi risttahuka kohta, nüüd tõestame ka püströöptahuka kohta ja seejärel kaldrööptahuka kohta.

1) Olgu  $AC_1$  (joon. 93) püströöptahukas, s. o. niisugune rööptahukas, mille põhi  $ABCD$  on rööpkülik ja kõik

külgtahud on riskülikud. Võtame tema põhjaks külgtahu  $AA_1B_1B$ , siis saame kaldrööptahuka. Vaadeldes teda kui kaldprisma erijuhtu, võime eelmise paragrahvi lemma põhjal kinnitada, et see rööptahukas on ruumvõrdne niisuguse püströöptahukaga, mille põhjaks on ristlõige  $MNPQ$  ja kõrguseks on lõik  $BC$ . Nelinurk  $MNPQ$  on riskülik, sest kõik tema nurgad on kahetahuliste täisnurkade joonnurgad; seepärast püströöptahukas, mille põhjaks on riskülik  $MNPQ$ , peab olema risttahukas ja seega tema ruumala võrdub tema kolme mõõtme korrutisega, milledeks võib võtta lõigud  $MN$ ,  $MQ$  ja  $BC$ . Seega:

$$\text{ruumala } AC_1 = MN \cdot MQ \cdot BC = (MQ \cdot BC) \cdot MN.$$

Kuid korrutis  $MQ \cdot BC$  väljendab rööpküliku  $ABCD$  pindala, seepärast:

$$\begin{aligned} \text{ruumala } AC_1 &= (\text{pindala } ABCD) \cdot MN = \\ &= (\text{pindala } ABCD) \cdot BB_1. \end{aligned}$$

2) Olgu  $AC_1$  (joon. 94) kaldrööptahukas. Ta on ruumvõrdne niisuguse püströöptahukaga, mille põhjaks on ristlõige  $MNPQ$  (s. o. servadega  $AD$ ,  $BC$ , ... ristiolev lõige) ja kõrguseks on serv  $BC$ . Kuid varem tõestatu põhjal püströöptahuka ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega, tähendab:

$$\text{ruumala } AC_1 = (\text{pindala } MNPQ) \cdot BC.$$

Kui lõike  $MNPQ$  kõrgus on  $TU$ , siis:

$$\text{pindala } MNPQ = MQ \cdot TU,$$

seega:

$$\text{ruumala } AC_1 = MQ \cdot TU \cdot BC = (BC \cdot MQ) \cdot TU.$$

Korrutis  $BC \cdot MQ$  on rööpküliku  $ABCD$  pindala, järelikult

$$\text{ruumala } AC_1 = (\text{pindala } ABCD) \cdot TU.$$

Jääb veel tõestada, et lõik  $TU$  on rööptahuka kõrguseks. Tõepoolest, servadega  $BC$ ,  $B_1C_1$ , ... ristuv lõige  $MNPQ$  on risti ka neid servi läbivate tahkudega  $ABCD$ ,  $BB_1C_1C$ , ... (§ 43). Seepärast, kui punktist  $U$  ehitada ristsirge tahule  $ABCD$ , siis see ristsirge peab asetsema tasapinnal  $MNPQ$  (§ 44) ja järelikult peab ühtima sirgega  $UT$ , mis asetseb sellel tasapinnal ja on risti sirgega  $MQ$ . Tähendab lõik  $UT$  on rööptahuka kõrgus. Seega ka kaldrööptahuka ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega.

Järeldus. Kui  $V$ ,  $S$  ja  $h$  on arvud, mis väljendavad vastavates ühikütes vastavalt rööptahuka ruumala, põhja pindala ja rööptahuka kõrgust, siis võib kirjutada:

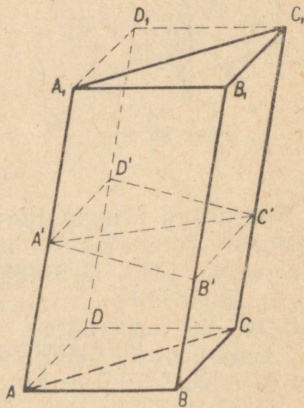
$$V = Sh.$$

### Prisma ruumala.

#### 88. Teoreem. Prisma ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega.

Esiteks tõestame selle teoreemi kolmnurkse prisma, siis hulknurkse prisma kohta.

1) Võtame läbi prisma  $ABCA_1B_1C_1$  serva  $AA_1$  tahuga  $BB_1C_1C$  paralleelse tasapinna ja läbi serva  $CC_1$  tahuga  $AA_1B_1B$  paralleelse tasapinna; seejärel pikendame kumagi põhja tasapinda lõikumiseni võetud tasapindadega. Siis saame rööptahuka  $BD_1$ , mille diagonaaltasapind  $AA_1C_1C$  jaotab kaheks kolmnurkseks prismaks (milledest üks on antud prisma). Tõestame, et need prismad on ruumvõrdsed. Selleks võtame ristlõike  $A'B'C'D'$ . See lõige on rööpkülik, mille diagonaal  $A'C'$  jaotab kaheks kongruentseks kolmnurgaks. Antud prisma on ruumvõrdne niisuguse püstprismaga, mille põhjaks on  $\triangle A'B'C'$  ja kõrguseks on serv  $AA_1$  (§ 86).

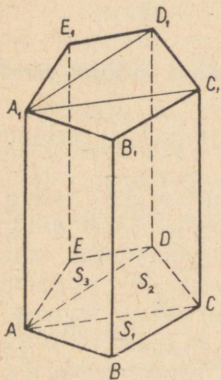


Joon. 95.

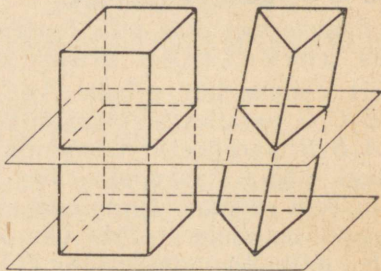
Teine kolmnurkne prisma on ruumvõrdne niisuguse püstprismaga, mille põhjaks on  $\triangle A'D'C'$  ja kõrguseks serv  $AA_1$ . Kuid kaks kongruentsete põhjadega ja võrdsete kõrgustega püstprismat on kongruentsed (sest teineteise sisse paigutamisel nad ühtivad); tähendab prismad  $ABCA_1B_1C_1$  ja  $ADCA_1D_1C_1$  on ruumvõrdsed. Sellest järeldub, et antud prisma ruumala moodustab poole rööptahuka  $BD_1$  ruumalast; tähistades prisma kõrguse tähega  $h$ , saame seega, et:

$$\begin{aligned}
 & \text{kolmnurkse prisma ruumala} = \\
 & = \frac{\text{pindala } ABCD \cdot h}{2} = \frac{\text{pindala } ABCD}{2} \cdot h = \\
 & = (\text{pindala } ABC) \cdot h.
 \end{aligned}$$

2) Võtame läbi hulknurkse prisma (joon. 96) serva  $AA_1$  diagonaaltasapinnad  $AA_1C_1C$  ja  $AA_1D_1D$ .



Joon. 96.



Joon. 97.

Siis antud prisma jaguneb kolmnurkseteks prismadeks. Viimaste ruumalade summa moodustab otsitava ruumala. Kui nende põhjade pindalasid tähistada tähtedega  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  ja ühist kõrgust tähega  $h$ , siis saame, et:

$$\begin{aligned}
 & \text{hulknurkse prisma ruumala} = \\
 & = S_1 \cdot h + S_2 \cdot h + S_3 \cdot h = (S_1 + S_2 + S_3) \cdot h = \\
 & = (\text{pindala } ABCDE) \cdot h.
 \end{aligned}$$

Järeldus. Kui  $V$ ,  $S$  ja  $h$  on arvud, mis väljendavad vastavates ühikutes vastavalt prisma ruumala, põhja pindala ja prisma kõrgust, siis võib kirjutada:

$$V = S \cdot h.$$

89. Cavalieri printsiip. Itaalia XVII sajandi matemaatik Cavalieri avaldas tõestuseta järgmise väite:

*kui kahte keha (mida piiravad tasapinnad või kõverpinnad) on võimalik asetada nii, et iga tasapind, mis on paralleelne mingi antud tasapinnaga ja lõikab mõlemat keha, annab lõikes nendega võrdpindsed kujundid, siis nende kahe ruumalad on võrdsed.*

Sellel lausel on olemas range tõestus, kuid see tõestus ei mahu elementaararvemaatika piiridesse, seepärast piirdume tema kontrollimisega mõne näite varal.

Cavalieri printsiibi nõudeile vastavad näiteks kaks pindvõrdset põhjadega ja võrdsete kõrgustega prisma (ükskõik, kas kolmnurksed või hulknurksed, joon. 97). Niisugused prismad, nagu teame, on ruumvõrdsed. Kui need prismad asetada põhjadega mingile tasapinnale, siis iga põhjadega paralleelne tasapind, mis lõikab ühte prisma, lõikab ka teist, kusjuures lõiked on pindvõrdsed kujundid, sest need kujundid on kongruentsed põhjadega, põhjad aga on pindvõrdsed. Tähendab Cavalieri printsiip leiab kinnitust sellel erijuhul.

See printsiip leiab kinnitust ka planimeetrias tema rakendamisel pindalade võrdlemiseks, nimelt:

*kui kahte kujundit võib asetada nii, et iga sirge, mis on paralleelne mingi antud sirgega ja lõikab mõlemat kujundit, annab lõikes nendega võrdsed lõigud, siis sellised kujundid on pindvõrdsed. Selle näiteks on kaks võrdsete aluste ja võrdsete kõrgustega rööpkülikut või kolmnurka (joon. 98).*



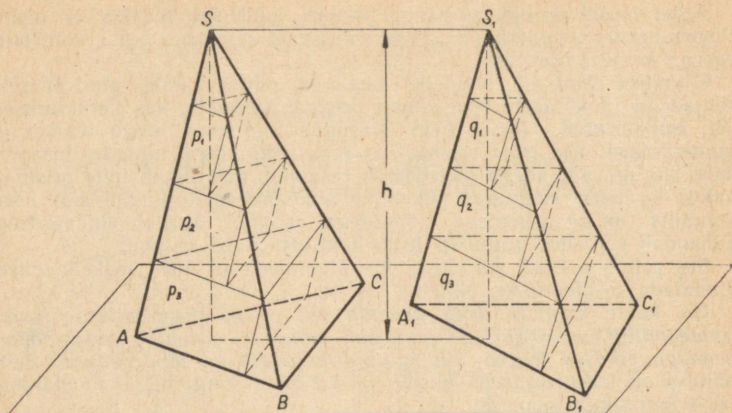
Joon. 98.

### Püramiidi ruumala.

#### 90. Lemma. Pindvõrdsete põhjadega ja võrdsete kõrgustega kolmnurksed püramiidid on ruumvõrdsed.

Meie tõestus koosneb kolmest osast. Esimeses osas tõestame mitte püramiidide eneste, vaid niisuguste abikehade ruumvõrdsuse, mis koosnevad üksteise peale paigutatud kolmnurksetest prismadest. Teises osas tõestame, et nende abikehade ruumalad neid moodustavate prismade arvu suurendamisel lähenevad püramiidide ruumaladele kuitahes ligidale. Lõpuks kolmandas osas veendume, et püramiidid ise on ruumvõrdsed.

I. Kujutleme, et püramiidid on paigutatud põhjadega mingile tasapinnale (nagu kujutatud joonisel 99); siis nende tipud asetsevad põhjade tasapinnaga paralleelsel sirgel ning püramiidide kõrgust võib kujutada ühe ja sama sirglõiguga  $h$ . Jaotame selle kõrguse  $n$  võrdseks osaks,



Joon. 99.

kusjuures  $n$  on mingi täisarv (näiteks 4 võrdseks osaks, nagu näidatud joonisel), ja asetame läbi jaotuspunktide rea põhjadega paralleelseid tasapindu.

Nende tasapindade ja püramiidide lõikumisel tekib rida kolmnurgakujulisi lõikeid, kusjuures püramiidi  $S$  lõiked on pindvõrdsed püramiidi  $S_1$  vastavate lõigetega (§ 77). Ehitame kummagi püramiidi sisse rea prismsid nii, et nende ülemisteks põhjadeks on kolmnurksed lõiked ja külgservad on ühes püramiidis paralleelsed servaga  $SA$ , teises püramiidis servaga  $S_1A_1$  ning iga prisma kõrgus on  $\frac{h}{n}$ . Sääraseid prismsid tekib kummaski püramiidis  $n-1$ ; nad moodustavad mingisuguse astmelise keha, mille ruumala on ilmselt väiksem kui selle püramiidi ruumala, millesse prismaid on ehitatud. Tähistame püramiidi  $S$  prismade ruumalad, alates tipust, järgemööda tähtedega  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{n-1}$  ja püramiidi  $S_1$  prismade ruumalad, samuti alates tipust, järgemööda tähtedega  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_{n-1}$ ; siis, pidades silmas, et igä vastavate prismade paari ( $p_1$  ja  $q_1, p_2$  ja  $q_2, \dots$ ) põhjad on pindvõrdsed ja kõrgused on võrdsed, võime kirjutada rea võrdusi:

$$p_1 = q_1; p_2 = q_2; p_3 = q_3; \dots; p_{n-1} = q_{n-1}.$$

Liites liikmeti kõik võrdused, leiame, et

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{n-1} &= \\ = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_{n-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Seega oleme tõestanud, et meie poolt ehitatud astmeliste abikehade ruumalad on võrdsed (iga arvu  $n$  puhul, milleks jaotame kõrguse  $h$ ).

II. Tähistanud püramiidide  $S$  ja  $S_1$  ruumalad vastavalt tähtedega  $V$  ja  $V_1$ , oletame, et

$$V - (p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{n-1}) = x$$

ja

$$V_1 - (q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_{n-1}) = y;$$

siit saame, et

$$(p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{n-1}) = V - x$$

ja

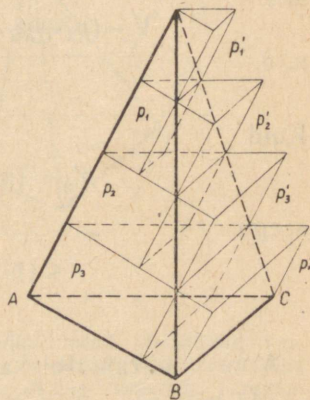
$$(q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_{n-1}) = V_1 - y.$$

Siis võime võrduse (1) kirjutada nii:

$$V - x = V_1 - y. \quad (2)$$

Kujutleme nüüd, et võrdsete osade arv  $n$ , milleks jaotame kõrguse  $h$ , kasvab piiramatult: kujutleme näiteks, et 4. osa asemel jaotame kõrguse 8-ks võrdseks osaks, siis 16-ks, siis 32-ks jne. ja et iga kord ehitame näidatud viisil kummaski püramiidis astmelise keha. Kuidas ka ei kasva astmelisi kehi moodustavate prismade arv, võrdus (1) ja seega ka võrdus (2) jäävad ikka kehtima. Seejuures ruumalad  $V$  ja  $V_1$  muidugi ei muutu, kuna suurused  $x$  ja  $y$ , mis näitavad, mille võrra püramiidide ruumalad ületavad vastavate astmeliste kehade ruumalaid, ilmselt järjest vähenevad. Tõestame, et suurused  $x$  ja  $y$  võivad saada kui tahes väikesteks (teisiti öeldes, et nad lähenevad nullile). Piisab, kui seda tõestame ühe suuruse kohta kahest, näiteks suuruse  $x$  kohta.

Selleks ehitame püramiidile  $S$  veel teise rea prismasid (joon. 100), mis moodustavad ka astmelise keha, kuid mille ruumala on püramiidi ruumalast suurem. Need pris-



Joon. 100.

mad ehitame samal viisil, nagu ehitasime sisemised prismad, ainult selle vahega, et me kolmnurgakujulisi lõikeid ei võta mitte prismade ülemisteks, vaid alumisteks põhjadeks. Seetõttu saame nüüd rea prismasid, mis on osaliselt väljaspool püramiidi, ning seepärast nad moodustavad uue, püramiidi ruumalast suurema ruumalaga astmelise keha. Sääraste prismade arv ei ole nüüd mitte  $n-1$ , nagu varem, vaid  $n$ . Tähistame nende ruumalad, alates tipust, järgemööda tähtedega  $p'_1, p'_2, p'_3, \dots, p'_n$ . Vaadeldes joonist näeme, et:

$$p'_1 = p_1, p'_2 = p_2, p'_3 = p_3, \dots, p'_{n-1} = p_{n-1}.$$

Seepärast

$$(p'_1 + p'_2 + \dots + p'_{n-1} + p'_n) - (p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1}) = p'_n.$$

Et

$$p'_1 + p'_2 + \dots + p'_{n-1} + p'_n > V$$

ja

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1} < V,$$

siis

$$V - (p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_{n-1}) < p'_n,$$

s. o.

$$x < p'_n.$$

Kuid

$$p'_n = (\text{pindala } ABC) \cdot \frac{h}{n},$$

seega

$$x < (\text{pindala } ABC) \cdot \frac{h}{n}.$$

Arvu  $n$  piiramatul kasvutamisel suurus  $\frac{h}{n}$  võib ilmselt saada kuitahes väikeseks (läheneb nullile). Seepärast korutis, mille üks tegur ei muutu, kuid teine tegur läheneb nullile, läheneb ka nullile, ja et positiivne arv  $x$  on sellest korutisest väiksem, siis läheneb tema ammuigi nullile.

Seesama arutlus kehtib ka suuruse  $y$  kohta.

Seega oleme tõestanud, et prismade arvu piiramatul kasvamisest astmeliste abikehade ruumalad lähenevad vastavate püramiidide ruumaladele kuitahes ligidale.

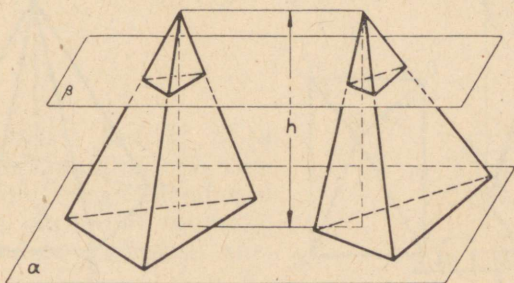
III. Seda silmas pidades võtame ülalkirjutatud võrduse (2) ja anname temale niisuguse kuju:

$$V - V_1 = x - y. \quad (3)$$

Nüüd tõestame, et see võrdus on võimalik ainult siis, kui  $V = V_1$  ja  $x = y$ . Tõepoolest, vahe  $V - V_1$ , nagu iga jäävate arvude vahe, peab olema jääv arv, kuid vahe  $x - y$  nagu iga muutuvate, nullile lähenevate arvude vahe, peab olema kas muutuv (nullile lähenev) arv või null. Et jääv arv ei saa võrduda muutuva arvuga, siis jääb kahest võimalusest ainult üks: vahe  $x - y = 0$ , siis  $V = V_1$  ja  $x = y$ .

Nii oleme tõestanud, et uuritavad püramiidid on ruumvõrdsed.<sup>1</sup>

Tõestatud lemma järeldub väga lihtsalt ka Cavalieri printsiibist. Tõepoolest, kujutleme, et kaks pindvõrdse põhjaga ja võrdse kõrgusega püramiidi on asetatud põhjadega mingile tasapinnale  $\alpha$  (joon. 101), siis iga tasapinnaga  $\alpha$  paralleelne tasapind  $\beta$  annab püramiide lõiga-



Joon. 101.

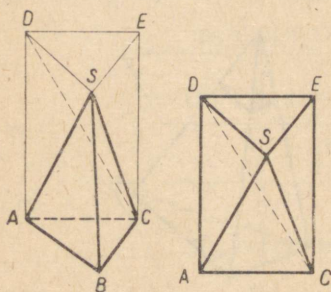
tes pindvõrdsed kolmnurgad (§ 77); järelikult need püramiidid vastavad Cavalieri printsiibi nõudeile ning seepärast nende ruumalad peavad olema võrdsed. Kuid seda tõestust ei saa nimetada rangeks, sest meie ei tõestanud Cavalieri printsiipi.

<sup>1</sup> Selle teoreemi nii keerulise tõestuse vajalikkust põhjustab fakt, et kahte ruumvõrdset keha ei saa nii hõlpsasti teisendada teineteiseks, nagu seda oli võimalik teha pindvõrdsete hulknurkadega tasapinnal. Nimelt kui on antud kaks ruumvõrdset hulknurkakat, siis üldisel juhul osutub võimatuks ühte neist tükeldada niisugusteks osadeks (ka täienduste abil), milledest saaks koostada teise. Eriti on see võimatu kahe vabalt võetud pindvõrdse põhjaga ja võrdse kõrgusega kolmnurkse püramiidi puhul.

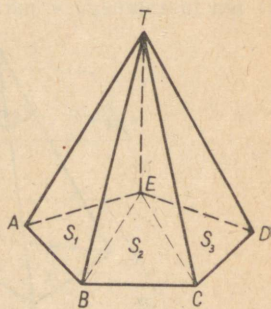
**91. Teoreem. Püramiidi ruumala võrdub põhja pindala ja kolmandiku kõrguse korrutisega.**

Esiteks tõestame selle teoreemi kolmnurkse, siis hulknurkse püramiidi kohta.

1) Ehitame kolmnurkse püramiidi  $SABC$  (joon. 102) põhjale niisuguse prisma  $SABCDE$ , mille kõrgus võrdub püramiidi kõrgusega ja mille üks külgserv ühtib servaga  $SB$ . Tõestame, et püramiidi ruumala moodustab ühe kolmandiku selle prisma ruumalast. Eraldame prismast antud püramiidi. Siis jääb järele nelinurkne püramiid  $SADEC$  (mis selguse pärast on eraldi kujutatud). Lõikame seda püramiidi tippu  $S$  ja põhja diagonaali  $DC$  läbiva tasapinnaga. Sel teel tekkinud kahel kolmnurksel püramiidil on ühine tipp  $S$  ning võrdsed põhjad  $DEC$  ja  $DAC$ , mis asetsevad ühes tasapinnas; tähendab, vastavalt eespool tõestatud lemmale, need püramiidid on ruumvõrdsed. Võrd-



Joon. 102.



Joon. 103.

leme ühte neist, nimelt püramiidi  $SDEC$ , antud püramiidiga. Püramiidi  $SDEC$  põhjaks võib võtta kolmnurga  $SDE$ ; siis tema tipuks on punkt  $C$  ja kõrgus on võrdne antud püramiidi kõrgusega. Et  $\triangle SDE = \triangle ABC$ , siis vastavalt samale lemmale on püramiidid  $CSDE$  ja  $SABC$  ruumvõrdsed.

Meie tükeldasime prisma  $SABCDE$  kolmeks ruumvõrdseks püramiidiks:  $SABC$ ,  $SDEC$  ja  $SDAC$  (on ilmne, et nii on võimalik tükeldada iga kolmnurkset prisma — see on kolmnurkse prisma üks tähtsamaid omadusi). Seega

antud püramiidiga kolme ruumvõrdse püramiidi ruumalade summa moodustab prisma ruumala; järelkult:

$$\begin{aligned} \text{ruumala } SABC &= \frac{1}{3} \text{ruumalast } SDEABC = \\ &= \frac{(\text{pindala } ABC) \cdot h}{3} = (\text{pindala } ABC) \cdot \frac{h}{3}, \end{aligned}$$

kus  $h$  tähistab püramiidi kõrgust.

2) Ehitame hulknurkse püramiidi  $TABCDE$  (joon. 103) põhja mingist tipust  $E$  diagonaalid  $EB$  ja  $EC$ . Seejärel paneme lõiketapinnad läbi iga diagonaali ja serva  $TE$ . Siis hulknurkne püramiid tükeldub kolmnurkseteks püramiidideks, millel on antud püramiidiga ühine kõrgus. Tähistades kolmnurksete püramiidide põhjade pindalad tähtedega  $S_1, S_2, S_3$  ja kõrguse tähega  $h$ , saame, et:

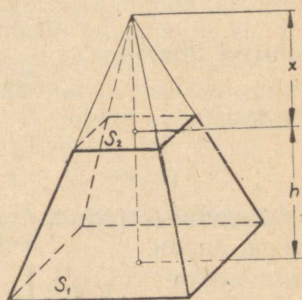
$$\begin{aligned} \text{ruumala } TABCDE &= \frac{1}{3} S_1 \cdot h + \frac{1}{3} S_2 \cdot h + \frac{1}{3} S_3 \cdot h = \\ &= (S_1 + S_2 + S_3) \cdot \frac{h}{3} = (\text{pindala } ABCDE) \cdot \frac{h}{3}. \end{aligned}$$

Järeldus. Kui  $V$ ,  $S$  ja  $h$  tähendavad arve, mis vastavates ühikutes väljendavad mistahes püramiidi ruumala, põhja pindala ja kõrgust, siis:

$$V = \frac{1}{3} Sh.$$

**92. Teoreem. Tüvipüramiidi ruumala võrdub kolme püramiidi ruumalade summaga, millede kõrgused on võrdsed antud tüvipüramiidi kõrgusega ja millede põhjadeks on: esimesel – tüvipüramiidi alumine põhi, teisel – ülemine põhi, kolmanda püramiidi põhja pindala võrdub tema ülemise ja alumise põhja pindala geomeetrilise keskmisega.**

Olgu tüvipüramiidi (joon. 104) põhjade pindalad  $S_1$  ja  $S_2$ , kõrgus  $h$  ning ruumala  $V$  (tüvipüramiid võib olla



Joon. 104.

ükskõik kas kolmnurkne või hulknurkne). Peame tõestama, et:

$$V = \frac{1}{3}S_1h + \frac{1}{3}S_2h + \frac{1}{3}h\sqrt{S_1S_2} = \frac{1}{3}h(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1S_2}),$$

kus  $\sqrt{S_1S_2}$  on suuruste  $S_1$  ja  $S_2$  geomeetriline keskmine. Tõestuseks paigutame väiksemale põhjale väikese püramiidi, mis antud tüvipüramiidi täiendab täispüramiidiks. Siis võime tüvipüramiidi ruumala  $V$  vaadelda kui täispüramiidi ja täienduspüramiidi ruumalade vahet.

Tähistades täienduspüramiidi kõrguse tähega  $x$ , leiame, et:

$$V = \frac{1}{3}S_1(h+x) - \frac{1}{3}S_2x = \frac{1}{3}(S_1h + S_1x - S_2x) = \frac{1}{3}[S_1h + (S_1 - S_2)x].$$

Kõrguse  $x$  leidmiseks kasutame teoreemi § 74, millele vastavalt võime kirjutada võrrandi:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{(h+x)^2}{x^2}.$$

Selle võrrandi lihtsustamiseks võtame tema mõlemast poolst positiivse ruutjuure:

$$\frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}} = \frac{h+x}{x}.$$

Sellest võrrandist (mida võime vaadelda kui võrret) saame:

$$x\sqrt{S_1} = h\sqrt{S_2} + x\sqrt{S_2},$$

millest leiame, et:

$$(\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2})x = h\sqrt{S_2},$$

seega:

$$x = \frac{h\sqrt{S_2}}{\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2}}.$$

Asendades leitud ruumala valemis tähe  $x$  selle avaldisega, saame:

$$V = \frac{1}{3} \left[ S_1h + \frac{(S_1 - S_2)h\sqrt{S_2}}{\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2}} \right]:$$

Et  $S_1 - S_2 = (\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2})(\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2})$ , siis pärast murru taandamist vahega  $\sqrt{S_1} - \sqrt{S_2}$  saame:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3}[S_1h + (\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2})h\sqrt{S_2}] = \\ &= \frac{1}{3}(S_1h + h\sqrt{S_1S_2} + S_2h) = \\ &= \frac{1}{3}h(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1S_2}), \end{aligned}$$

s. o. saame valemi, mida pidimegi tõestama.

### III. HULKTAHUKATE SARNASUS.

**93. Definiitsioon.** Kahte hulktahukat nimetatakse **sarnasteks**, kui neil on vastavalt kongruentsed mitmetahulised nurgad ja vastavalt sarnased tahud. Elemente, mis sarnastel hulktahukatel on nii vastamisi seotud, nimetatakse **vastavateks**.

Sellest definiitsioonist järeldub, et sarnastel hulktahukatel

1) kahetahulised nurgad on vastavalt võrdsed ja asetsevad ühteviisi, sest mitmetahulised nurgad on kongruentsed;

2) vastavad servad on võrdelised, sest iga kahe sarnase tahu vastavate servade suhe on üks ja sama ning kummagi hulktahuka lähistahkudel on ühine serv.

Sarnaste hulktahukate olemasolu võimalust näitab järgmine teoreem.

**94. Teoreem.** Püramiidi (joon. 105) põhjaga paralleelne lõiketapind ( $A_1B_1C_1D_1E_1$ ) eraldab püramiidist temaga sarnase püramiidi ( $SA_1B_1C_1D_1E_1$ ).

Et  $A_1B_1 \parallel AB$ ,  $B_1C_1 \parallel BC$  jne., siis nende kahe püramiidi külgtahud on sarnased (§ 74). Jääb veel tõestada mitmetahuliste nurkade kongruentsus. Mitmetahuline nurk  $S$  on mõlemal püramiidil ühine; kolmetahulised nurgad  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ , ... on vastavalt võrdsed nurkadega  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ..., sest igal nende nurkade paaril on ühine kahetahuline nurk vastavalt võrdsete ja ühteviisi asetsevate tasanurkade vahel; nii on nurkadel  $A$  ja  $A_1$  ühine kahetahuline nurk (servaga  $AS$ ) võrdsete tasanurkade vahel:

$$\angle SA_1E_1 = \angle SAE \text{ ja } \angle SA_1B_1 = \angle SAB.$$

**95. Teoreem.** Sarnaste hulktahukate pindalad suhtuvad nagu vastavate servade ruudud.

Tähistagu tähed  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  ühe hulktahuka üksikute tahkude pindalad, tähed  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$  tähistagu teise, esimesega sarnase hulktahuka vastavate tahkude pindalad; oletame veel, et lõigud  $L$  ja  $l$  on mingi kahe teineteisele vastava serva pikkused.

Siis vastavate tahkude sarnasuse ja vastavate servade võrdelisuse tõttu saame, et:

$$\frac{P_1}{p_1} = \frac{L^2}{l^2}, \quad \frac{P_2}{p_2} = \frac{L^2}{l^2}, \quad \frac{P_3}{p_3} = \frac{L^2}{l^2}, \dots, \quad \frac{P_n}{p_n} = \frac{L^2}{l^2},$$

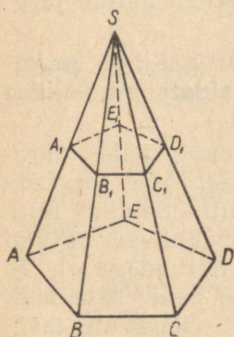
millest võrdsete suhete omaduse põhjal leiame, et:

$$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} = \frac{L^2}{l^2}.$$

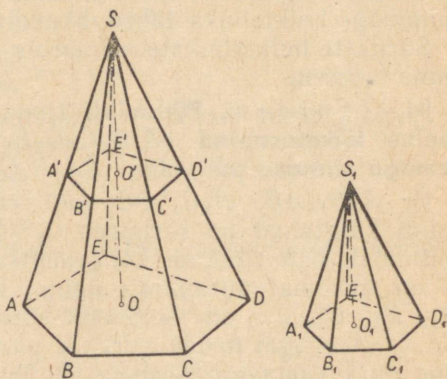
**96. Teoreem. Sarnaste hulktahukate ruumalad suhtuvad nagu vastavate servade kuubid.**

Piirdume selle teoreemi tõestamisega ainult sarnaste püramiidide kohta. Olgu (joon. 106) püramiidid  $SABCDE$  ja  $S_1A_1B_1C_1D_1E_1$  sarnased. Paigutame teise püramiidi esimese sisse nii, et nende mitmetahulised nurgad  $S$  ja  $S_1$  ühtivad.

Siis põhi  $A_1B_1C_1D_1E_1$  satub asendisse  $A'B'C'D'E'$ , kusjuures küljed  $A'B'$ ,  $B'C'$ , ... on vastavalt paralleelsed



Joon. 105.



Joon. 106.

külgedega  $AB$ ,  $BC$ , ... (selle tõttu, et kolmetahuliste nurkade  $A$  ja  $A_1$ ,  $B$  ja  $B_1$  jne. vastavad tasanurgad on võrdsed). Seepärast tasapind  $A'B'C'D'E'$  on paralleelne tasapinnaga  $ABCDE$ . Olgu  $SO$  ja  $SO'$  püramiidide kõrgused.

Siis:

$$\text{ruumala } SABCDE = \frac{(\text{pindala } ABCDE) \cdot SO}{3};$$

$$\text{ruumala } SA'B'C'D'E' = \frac{(\text{pindala } A'B'C'D'E') \cdot SO'}{3}.$$

Seega:

$$\frac{\text{ruumala } SABCDE}{\text{ruumala } SA'B'C'D'E'} = \frac{\text{pindala } ABCDE}{\text{pindala } A'B'C'D'E'} \cdot \frac{SO}{SO'};$$

kuid:

$$\frac{\text{pindala } ABCDE}{\text{pindala } A'B'C'D'E'} = \frac{SO^2}{(SO')^2},$$

seega:

$$\frac{\text{ruumala } SABCDE}{\text{ruumala } SA'B'C'D'E'} = \frac{SO^3}{(SO')^3} = \frac{SA^3}{(SA')^3}.$$

Järelikult ka:

$$\frac{\text{ruumala } SABCDE}{\text{ruumala } S_1A_1B_1C_1D_1E_1} = \frac{SA^3}{S_1A_1^3}.$$

#### IV. KORRAPÄRASED HULKTAHUKAD.

Hulktahukad nimetatakse **korrapäraseks**, kui kõik tema tahud on võrdsed korrapärased hulknurgad ja kõik mitmetahulised nurgad on kongruentsed (säärane on näiteks kuup). Sellest definitsioonist järeldub, et korrapärastel hulktahukatel on võrdsed kõik tasanurgad, kõik kahetahulised nurgad ja kõik servad.

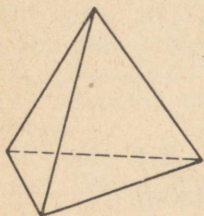
**97. Korrapäraste hulktahukate loetelu.** Peame silmas, et mitmetahulise nurga väikseim tahkude arv on kolm ja et kumera mitmetahulise nurga tasanurkade summa on väiksem kui  $2\pi$  ehk  $360^\circ$  (§ 51). Korrapärase kolmnurga iga nurk on  $60^\circ$ . Kui võtame  $60^\circ$  liidetavana 3, 4 ja 5 korda, siis saame summad, mis on väiksemad kui  $360^\circ$ ; kui aga võtame  $60^\circ$  liidetavana 6 või rohkem korda, siis saame summa, mis on  $360^\circ$  või suurem kui  $360^\circ$ . Seepärast võib võrdsetest tasanurkadest, mis on võrdsed korrapärase kolmnurga nurkadega, moodustada ainult kolme liiki mitmetahulisi nurki: kolmetahulisi, neljatahulisi ja viietahulisi. Järelikult, kui korrapärase hulktahuka tahkudeks on korrapärased kolmnurgad, siis hulktahuka tipust võib lähtuda kas 3 või 4 või 5 serva. Sellele vastavalt on kolm liiki kolmnurksete tahkudega korrapäraseid kehasid.

1) Korrapärane nelitahukas ehk korrapärane **tetraeeder**, mille pind koosneb neljast korrapärasest kolmnurgast (joon. 107). Tal on 4 tahku, 4 tippu ja 6 serva.

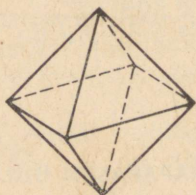
2) Korrapärane kaheksatahukas ehk korrapärane **oktaeeder**, mille pind koosneb kaheksast korrapärasest kolmnurgast (joon. 108). Tal on 8 tahku, 6 tippu ja 12 serva.

3) Korrapärase kakskümmendtahukas ehk korrapärase **ikosaeder**, mille moodustavad kakskümmend korräparast kolmnurka (joon. 109). Tal on 20 tahku, 12 tippu ja 30 serva.

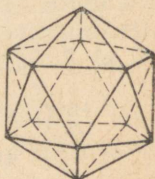
Ruudu nurk on  $90^\circ$  ja korrapärase viisnurga nurk on  $108^\circ$ ; võttes neid nurki liidetavana 3 korda, saame



Joon. 107.



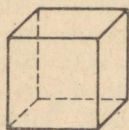
Joon. 108.



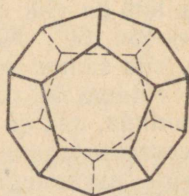
Joon. 109.

$360^\circ$ -st väiksemad summad, võttes aga 4 või enam korda, saame summas  $360^\circ$  või rohkem. Seepärast võib säärestest tasanurkadest, mis on võrdsed ruudu või korrapärase viisnurga nurkadega, moodustada ainult kolmetahulisi nurki.

Ja seepärast, kui hulktahuka tahkudeks on ruudud, siis igast tipust võib lähtuda ainult 3 serva. Seda liiki korra-



Joon. 110.



Joon. 111.

päraseid hulktahukaid on ainult üks — see on korrapärase kuustahukas ehk korrapärase **heksaeder** ehk kuup (joon. 110), tal on 6 tahku, 8 tippu ja 12 serva.

Kui korrapärase hulktahuka tahkudeks on korrapärase viisnurgad, siis igast tipust võib lähtuda ainult 3 serva.

Seda liiki korrapäraseid hulktahukaid on ainult üks — korrapärase kaksteisttahukas ehk korrapärase **dodekaeder**. Tal on 12 tahku, 20 tippu ja 30 serva (joon. 111).

Korrapärase kuusnurga nurk on  $120^\circ$ , seega sääras-  
test nurkadest ei saa moodustada isegi kolmetahulist  
nurka. Kui korrapärase hulknurga külgede arv on suurem  
kuuest, siis tema nurkadest ei saa ammuigi moodustada  
mingit kumerat mitmetahulist nurka.

Siit järeldub, et korrapärase hulktahuka tahkudeks  
võivad olla ainult korrapäraseid kolmnurgad, ruudud ja  
korrapäraseid viisnurgad.

Seega on võimalikud ainult viis liiki korrapäraseid  
hulktahukaid.

**98. Korrapärase hulktahukate konstruktsioon.** Eespool  
toodud arutlused korrapärase hulktahukate võimalikkude  
liikide kohta näitavad, et korrapäraseid hulktahukaid ei  
või olla rohkem kui viis liiki.

Kuid sellest ei saa järeldada, et kõik need viis liiki  
korrapäraseid hulktahukaid ka tõeliselt on olemas, s. o. et  
tasapindade asetamiste abil ruumis võib teostada kõige  
viie liigi korrapärase hulktahukate konstruktsioone. Et  
veenduda kõikide korrapärase hulktahukate olemasolus,  
selleks piisab, kui näitame iga keha ehitamise viisi. Kuubi  
ehitamise viis on eriti lihtne. Võtame vabalt tasapinna  $\alpha$  ja  
sellel mingi ruudu; läbi selle külgede paneme risttasapin-  
nad tasapinnale  $\alpha$ . Sääraseid tasapindu on neli. Edasi  
võtame tasapinnaga  $\alpha$  paralleelse tasapinna  $\beta$ , mis asetseb  
viimasest ruudu külje pikkusega võrdsele kaugusel.

Need kuus tasapinda moodustavad kuubi tahud; kaks-  
teist sirget, mida mööda lõikuvad lõikuvate tasapindade  
paarid, on kuubi servadeks ja kaheksa punkti, milles lõi-  
kuvad lõikuvate tasapindade kolmikud, on kuubi tippudeks.  
Selles on kerge veenduda, vaadeldes vahetult tekkinud  
punktide, sirgete ja tasapindade kogu.

Kui oskame ehitada kuubi, siis on kerge leida ka kõi-  
kide teiste korrapärase hulktahukate ehitamise viise.

### Korrapärase tetraeedri konstruktsioon.

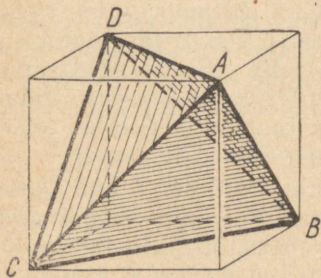
Olgu antud kuup (joon. 112). Võtame mingi tema tipu,  
näiteks tipu  $A$ . Selles lõikuvad kuubi kolm ruudukujulist  
tahku. Võtame igal ruudul tipu  $A$  vastastipu. Olgu need  
kuubi tipud  $B$ ,  $C$  ja  $D$ . Punktid  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ja  $D$  on korra-  
pärase tetraeedri tippudeks. Tõepoolest, lõikudest  $AB$ ,  $BC$ ,

$CD$ ,  $AD$ ,  $BD$  ja  $AC$  on igaüks ilmselt kuubi ühe tahu diagonaaliks. Ja seepärast kõik need lõigud on võrdsed. Siit järeldub, et kolmnurkses püramiidis, mille tipp on  $A$  ja põhi on  $BCD$ , on kõik tahud korrapärased kolmnurgad, seega see püramiid on korrapärane tetraeeder. See tetraeeder on kujundatud antud kuupi.

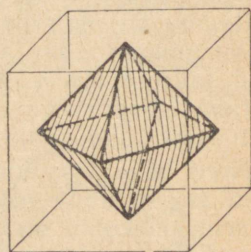
On kasulik tähele panna, et kuubi ülejäänud neli tippu on teise samasse kuupi kujundatud korrapärase tetraeedri tippudeks, mis on kongruentne esimesega.

### Oktaeedri konstruksioon.

Kui antud kuubil ehitada kõikide tahkude keskpunktid, siis sel teel saadud kuus punkti on korrapärase oktaeedri tippudeks. Selles on kerge veenduda, vaadeldes joonist 113.



Joon. 112.



Joon. 113.

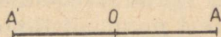
### Dodekaeedri ja ikosaeedri konstruksioon.

Kui läbi kuubi iga serva võtta tasapind, millel kuubi pinnaga ei ole teisi ühiseid punkte peale selle serva punktide, siis 12 saadud tasapinda on mingi 12-tahuka tahkudeks. Selle hulktahuka lähenu uurimine näitab, et tasapindade kalded kuubi tahkude suhtes võib nii valida, et tekib korrapärane dodekaeeder.

Lõpuks, kui oskame ehitada dodekaeedrit, siis ikosaeedri ehitamine ei tee raskusi: dodekaeedri tahkude keskpunktid on ikosaeedri tippudeks.

## V. RUUMILISTE KUJUNDITE SÜMMEETRIA.

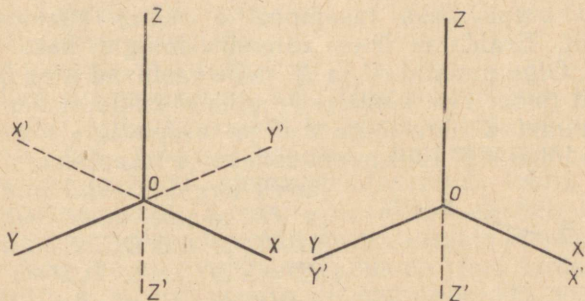
99. Tsentraalne sümmeetria. Kahte kujundit nimetatakse ruumi mingi punkti  $O$  suhtes sümmeetrilisteks, kui ühe kujundi igale punktile  $A$  vastab teise kujundi punkt  $A'$ , mis asetseb sirgel  $OA$  teisel pool punkti  $O$  samal kaugusel sellest punktist nagu punkt  $A$  (joon. 114). Punkti  $O$  nime-



Joon. 114.

tatakse kujundite sümmeetriakeskpunktiks. Sääraste sümmeetriliste kujundite näidet ruumis me juba nägime (§ 53), kui pikendasime mitmetahulise nurga servi üle tema tipu ning saime antud mitmetahulise nurgaga sümmeetrilise mitmetahulise nurga.

Sümmeetriliste kujundite vastavad lõigud ja vastavad nurgad on võrdsed. Sellele vaatamata ei saa nimetada neid kujundeid kongruentseteks: neid ei saa paigutada teineteise sisse seetõttu, et ühe kujundi elementide järje-



Joon. 115.

kord on erinev teise kujundi elementide järjekorrast, nagu nägime sümmeetriliste mitmetahuliste nurkade näites.

Erijuhtumitel sümmeetrilised kujundid võivad ka ühtida, kuid seejuures ei ühti nende vastavad elemendid. Näiteks võtame kolmetahulise täisnurga (joon. 115) tipuga  $O$  ja servadega  $OX, OY, OZ$ .

Ehitame temale sümmeetrilise nurga  $OX'Y'Z'$ . Nurga  $WXYZ$  võib paigutada nurga  $OX'Y'Z'$  sisse nii, et serv  $OX$  ühtib servaga  $OY'$  ning serv  $OY$  ühtib servaga  $OX'$ . Kui

aga paigutada ühte vastavad servad  $OX$  ja  $OX'$  ning  $OY$  ja  $OY'$ , siis servad  $OZ$  ja  $OZ'$  lähevad teineteisele vastasuundades.

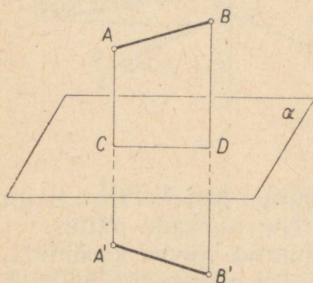
Kui sümmeetrilised kujundid moodustavad teineteisega koos ühe geomeetrilise keha, siis öeldakse, et sellel geomeetrilisel kehal on sümmeetriakeskpunktid. Seega, kui antud kehal on sümmeetriakeskpunkt, siis igale selle keha punktile vastab mingi teine sellesama keha sümmeetriline punkt. Meile tuttavatest geomeetrilistest kehadest on sümmeetriakeskpunkt näiteks: 1) rööptahukal; 2) prisma, mille põhjaks on paarisarvulise külgede arvuga korrapärane hulknurk.

Korrapärasel tetraeedril ei ole sümmeetriakeskpunkti.

**100. Sümmeetria tasapinna suhtes.** Kahte ruumilist kujundit nimetatakse sümmeetrilisteks tasapinna  $\alpha$  suhtes, kui ühe kujundi igale punktile  $A$  vastab teise kujundi punkt  $A'$ , kusjuures lõik  $AA'$  on risti tasapinnaga  $\alpha$  ja poolitub lõikumisel selle tasapinnaga.

**Teoreem. Kahe sümmeetrilise kujundi iga paar vastavaid lõike on võrdsed.**

Olgu antud kaks tasapinna  $\alpha$  suhtes sümmeetrilist kujundit. Eraldame ühes kujundis mingid kaks punkti  $A$  ja  $B$ . Olgu punktid  $A'$  ja  $B'$  neile vastavad teise kujundi punktid (joon. 116, joonisel kujundeid endid ei ole näidatud). Punkt  $C$  olgu lõigu  $AA'$  ja tasapinna  $\alpha$  lõikepunkt,  $D$  olgu lõigu  $BB'$  lõikepunkt sellesama tasapinnaga. Ühendades sirglõigu abil punktid  $C$  ja  $D$ , saame kaks nelinurka,  $ABDC$  ja  $A'B'DC$ . Et  $AC = A'C$ ,  $BD = B'D$  ja  $\angle ACD = \angle A'CD$ ,  $\angle BDC = \angle B'DC$  kui täisnurgad, siis need nelinurgad on kongruentsed (milles veendume kergesti nende paigutamise teel teineteisele). Järelikult  $AB = A'B'$ . Sellest teoreemist järeldub otseselt, et tasapinna suhtes sümmeetriliste kujundite vastavad tasanurgad ja vastavad kahetahulised nurgad on võrdsed. Sellele vaatamata neid kujundeid ei saa teineteise sisse paigutada nii, et nende vastavad osad ühtiksid,



Joon. 116.

võrdsed. Sellele vaatamata neid kujundeid ei saa teineteise sisse paigutada nii, et nende vastavad osad ühtiksid,

sest ühe kujundi osade järjestus on vastupidine teise kujundi osade järjestusega (seda tõestatakse hiljem, § 102). Tasapinna suhtes sümmeetriliste kujundite lihtsaimaks näiteks on mistahes ese ja tema peegeldus tasapinnalises peeglis: iga kujund on peegli tasapinna suhtes sümmeetriline oma peegeldusega.

Kui mingit geomeetrilist keha võib tükeldada kaheks osaks, mis on sümmeetrilised mingi tasapinna suhtes, siis seda tasapinda nimetatakse antud keha sümmeetriatasapinnaks.

Geomeetrilisi kehi, millel on sümmeetriatasapind, esineb väga palju looduses ja igapäevases elus. Inimese ja looma kehal on sümmeetriatasapind, mis jaotab keha paremaks ja vasakuks pooleks.

Sellest näitest nähtub eriti selgesti, et sümmeetrilisi kujundeid ei saa teineteise sisse paigutada.

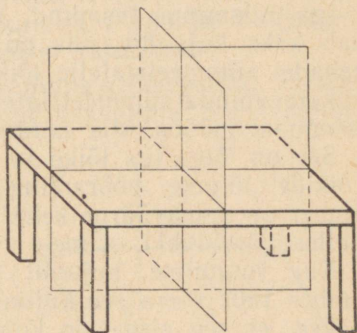
Nii on parema ja vasaku

käe labad sümmeetrilised, kuid ühtima neid viia ei saa, mis nähtub sellestki, et üks ja sama kinnas ei sobi nii paremale kui vasakule käele. Igapäevastest tarbeasjadest on paljudel sümmeetriatasapind: toolil, söögilaulal, raamatukapil, diivanil jm. Mõnel esemel, näiteks söögilaulal, on isegi kaks sümmeetriatasapinda (joon. 117).

Sümmeetrilist eset vaadeldes püüame tema suhtes harilikult võtta niisugust asendit, et meie keha või vähemalt meie pea sümmeetriatasapind ühtiks selle eseme sümmeetriatasapinnaga. Sel juhul on eseme kuju sümmeetrilisus eriti märgatav.

**101. Teljeline sümmeetria. Teist järku sümmeetriatelg.** Kahte kujundit nimetatakse sümmeetrilisteks telje  $l$  suhtes, kui esimese kujundi igale punktile  $A$  vastab teise kujundi punkt  $A'$  nii, et lõik  $AA'$  on risti teljega  $l$ , lõikub temaga ja lõikepunktis poolitub.

Telge  $l$  ennast nimetatakse teist järku sümmeetriateljeks.



Joon. 17.

Sellest definitsioonist järeldub otseselt, et kui kahte mingi sirge suhtes sümmeetrilist keha lõigata selle sirge risttasapinnaga, siis tekib kaks tasapinnalist kujundit, mis on sümmeetrilised sirge ja tasapinna lõikepunkti suhtes.

Edasi on siit kerge järeldada, et kahte telje suhtes sümmeetrilist keha on võimalik viia teineteisega ühtima, pöörates ühte neist sümmeetriatelje ümber  $180^\circ$  võrra. Kujutleme kõiki võimalikke sümmeetriateljega ristuvaid tasapindu.

Iga niisugune tasapind, lõigates kumbagi keha, sisaldab kaks kujundit, mis on sümmeetrilised tasapinna ja kehade sümmeetriatelje lõikepunkti suhtes. Kui pöörata lõiketaspinda sümmeetriatelje ümber  $180^\circ$ , libistades teda iseennast mööda, siis esimene kujund ühtib teisega.

See on õige iga lõike ja tasapinna kohta. Kuid keha kõikide lõigete pööramine  $180^\circ$  võrra sümmeetriatelje ümber on samaväärne keha enda pööramisega  $180^\circ$  võrra. Sellest järeldubki, et meie väide on õige.

Kui ruumilise kujundi pööramisel mingi sirgjoone ümber  $180^\circ$  võrra see kujund ühtib iseenesega, siis öeldakse, et see sirge on kujundi teist järku sümmeetriateljeks.

Nimetus «teist järku sümmeetriatelg» tuleneb sellest, et täispöörde jooksul selle telje ümber keha satub kaks korda esialgse asendiga ühtivasse asendisse (arvestades ka esialgset asendit). Geomeetriliste kehade näideteks, millel on teist järku sümmeetriatelg, võivad olla:

1) korrapärase püramiid, mille külgtahkude arv on paarisarv; tema sümmeetriateljeks on tema kõrgus;

2) risttahukas; tal on kolm sümmeetriatelge: nendeks on vastastahkude keskpunkte läbivad sirged;

3) korrapärase prisma, mille külgtahkude arv on paarisarv. Tema sümmeetriateljeks on iga sirge, mis läbib vastastahkude (kas külgtahkude või põhitahkude) keskpunkte. Kui prisma külgtahkude arv on  $2k$ , siis sümmeetriatelgede arv on  $k+1$ . Peale selle on niisuguse prisma sümmeetriateljeks iga sirge, mis läbib tema teineteise vastas asetsevate külgservade keskpunkte. Sääraste sümmeetriatelgede arv on  $k$ .

Seega on korrapärasel  $2k$ -nurksel prismal  $2k+1$  sümmeetriatelge.

**102. Seos mitmesuguste ruumiliste sümmeetria liikide vahel.** Eri liiki sümmeetria vahel ruumis — teljelise,

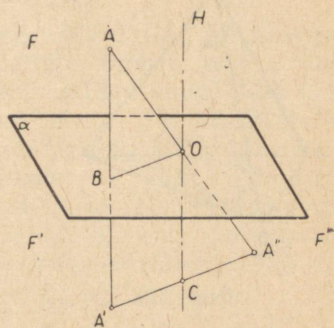
tasapinnalise ja tsentraalse sümmeetria vahel — kehtib seos, mida väljendab järgmine teoreem.

**Teoreem.** Kui kujund  $F$  on sümmeetriline kujundiga  $F'$  tasapinna  $\alpha$  suhtes ja ühtlasi sümmeetriline kujundiga  $F''$  tasapinnal  $\alpha$  asetseva punkti  $O$  suhtes, siis kujundid  $F'$  ja  $F''$  on sümmeetrilised telje suhtes, mis läbib punkti  $O$  ja on risti tasapinnaga  $\alpha$ .

Võtame kujundi  $F$  mingi punkti  $A$  (joon. 118). Sellele vastab kujundi  $F'$  punkt  $A'$  ja kujundi  $F''$  punkt  $A''$  (kujundeid  $F$ ,  $F'$  ja  $F''$  ise ei ole joonisel kujutatud).

Olgu  $B$  sirglõigu  $AA'$  ja tasapinna  $\alpha$  lõikepunkt. Võtame punktidega  $A$ ,  $A'$  ja  $O$  määratud tasapinna. See tasapind on risti tasapinnaga  $\alpha$ , sest ta läbib sirget  $AA'$ , mis on risti tasapinnaga  $\alpha$ . Tõmbame tasapinnal  $AA'O$  sirgele  $OB$  ristsirge  $OH$ . Sirge  $OH$  on ka risti tasapinnaga  $\alpha$ . Olgu punkt  $C$  sirgete  $A'A''$  ja  $OH$  lõikepunkt.

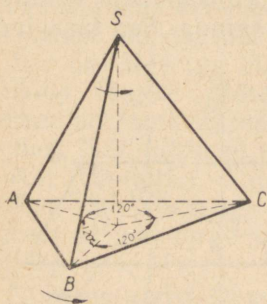
Sirglõik  $BO$  ühendab kolmnurgas  $AA'A''$  külgede  $AA'$  ja  $AA''$  keskpunkte, seega  $BO \parallel A'A''$ , kuid  $BO \perp OH$ , tähendab  $A'A'' \perp OH$ . Edasi, et punkt  $O$  on külje  $AA''$  keskpunkt ja  $CO \parallel AA'$ , siis  $A'C = A''C$ . Siit järeldame, et punktid  $A'$  ja  $A''$  on sümmeetrilised telje  $OH$  suhtes. Seesama on kehtiv kujundi kõikide teiste punktide kohta. Seega meie teoreem on tõestatud. Sellest teoreemist järeldub otseselt, et kaks tasapinna suhtes sümmeetrilist kujundit ei saa ühtida nii, et nende vastavad osad ühtiksid. Tõepoolest, kujund  $F'$  ühtib kujundiga  $F''$  tema pööramisel  $180^\circ$  võrra telje  $OH$  ümber. Kuid kujundid  $F''$  ja  $F$  ei saa ühtida, sest nad on sümmeetrilised punkti suhtes; järelikult ei saa ühtida ka kujundid  $F$  ja  $F'$ .



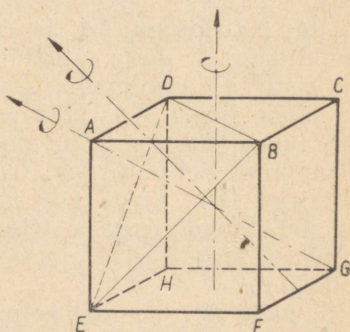
Joon. 118.

**103. Kõrgemat järku sümmeetriateljed.** Kujund, millel on sümmeetriatelg, ühtib iseenesega pärast sümmeetriatelje ümber pööramist  $180^\circ$  võrra. Kuid on võimalikud juhud, mil kujund ühtib oma esialgse asendiga pärast pöö-

ramist mingi telje ümber vähem kui  $180^\circ$  võrra. Nii et kui keha teeb selle telje ümber täispöörde, siis ühtib ta täispöörde vältel oma esialgse asendiga mitu korda. Niisugust telge nimetatakse kõrgemat järku sümmeetriateljeks, kusjuures täispöörde vältel keha esialgse asendiga ühtivate asendite arvu nimetatakse sümmeetriatelje järguks. See telg ei tarvitse ühtida teist järku sümmeetriateljega. Nii ei ole korrapärasel kolmnurksel püramiidil teist järku sümmeetriatelge, kuid kõrgus on tema kolmandat järku sümmeetriateljeks. Tõepoolest, pärast selle



Joon. 119.



Joon. 120.

püramiidi pöörämist tema kõrguse ümber  $120^\circ$  võrra ta ühtib iseenesega (joon. 119). Püramiidi pöörämisel kõrguse ümber võtab ta kolm asendit, mis ühtivad lähteasendiga, lähteasend kaasa arvatud. Kergesti nähtub, et iga paarisjärku sümmeetriatelg on ühtaegu ka teist järku sümmeetriateljeks.

Kõrgemat järku sümmeetriatelgede näited:

1) korrapärasel  $n$ -nurksel püramiidil on  $n$ -ndat järku sümmeetriatelg; selleks teljeks on püramiidi kõrgus;

2) korrapärasel  $n$ -nurksel prisma on  $n$ -ndat järku sümmeetriatelg; selleks teljeks on prisma põhjade keskpunkte läbiv sirge.

**104. Kuubi sümmeetria.** Nagu iga rööptahuka, nii ka kuubi diagonaalide lõikepunkt on tema sümmeetriakeskpunktiks.

Kuubil on üheksa sümmeetriatasapinda: kuus diagonaaltasapinda ja kolm tasapinda, mis läbivad iga nelja paralleelse serva keskpunkte.

Kuubil on üheksa teist järku sümmeetriatelge: kuus sirget, mis ühendavad tema vastasservade keskpunkte, ja kolm sirget, mis ühendavad vastastahkude keskpunkte (joon. 120). Viimased sirged on neljandat järku sümmeetriatelgedeks. Kuubil on peale selle neli kolmandat järku sümmeetriatelge, mis on tema diagonaalideks. Tõepoolest, kuubi diagonaal  $AG$  (joon. 120) on ilmselt ühte viisi kaldu servade  $AB$ ,  $AD$  ja  $AE$  suhtes ja need servad on ühte viisi kaldu üksteise suhtes. Kui ühendada punktid  $B$ ,  $D$  ja  $E$ , siis saame korrapärase kolmnurkse püramiidi, mille kõrgus asub kuubi diagonaalil. Kui püramiidi pööramisel kõrguse ümber püramiid ühtib iseenesega, siis ka kogu kuup ühtib oma lähteasendiga. Muid sümmeetriatelgi, nagu kerge on veenduda, kuubil ei ole.

Vaatame, mitmel eri viisil kuup võib ühtida iseenesega. Pööramine hariliku sümmeetriatelje ümber annab ühe lähteasendist erineva kuubi asendi, milles kuup ühtib iseenesega. Pööramine kolmandat järku sümmeetriatelje ümber annab kaks niisugust asendit ning pööramine neljandat järku sümmeetriatelje ümber — kolm niisugust asendit. Et kuubil on kuus teist järku sümmeetriatelge (need on harilikud sümmeetriateljed), neli kolmandat järku ning kolm neljandat järku sümmeetriatelge, siis on

$$6 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 3 = 23$$

lähteasendist erinevat kuubi asendit, milles ta ühtib iseenesega.

On kerge otseselt veenduda, et kõik need asendid erinevad üksteisest ja ka kuubi lähteasendist. Koos lähteasendiga moodustavad nad 24 võimalikku kuubi iseenesega ühtimise juhtu.

## HARJUTUSI.

1. Antud kuubi serva pikkus on  $a$ . Avaldada kaks korda suurema ruumalaga kuubi serva pikkus.

Märkus. See vanast ajast tuntud kuubi kahekordistamise ülesanne lahendub kergesti arvutamise teel (nimelt:  $x = \sqrt[3]{2a^3} = a\sqrt[3]{2} = a \cdot 1,25992\dots$ ), kuid konstruktsiooni teel (sirkli ja joonlaua abil) teda lahendada ei saa, sest otsitav avaldis sisaldab kuupjuurt arvust, mis ei ole ratsionaalarvu kuup.

2. Arvutada niisuguse püstprisma pindala ja ruumala, mille põhjaks on korrapärane kõõlkolmnurk ringis raadiusega  $r = 2$  m ja

mille kõrgus võrdub sama ringi korrapärase puutujakuusnurga küljega.

3. Arvutada korrapärase kaheksanurkse prisma pindala ja ruumala, kui prisma kõrgus  $h=6$  dm ja põhiserv  $a=8$  cm.

4. Arvutada korrapärase kuusnurkse püramiidi külgpindala ja ruumala, kui püramiidi kõrgus on 1 m ja apoteem moodustab kõrgusega  $30^\circ$ -se nurga.

5. Avaldada kolmnurkse püramiidi ruumala, kui püramiidi iga külgserv on  $l$  ja põhiservad on  $a$ ,  $b$  ja  $c$ .

6. Antud on kolmetahuline nurk  $SABC$ , mille kõik kolm tasannurka on täisnurgad. Tema servadele on paigutatud pikkused:  $SA=a$ ,  $SB=b$  ja  $SC=c$ . Läbi punktide  $A$ ,  $B$  ja  $C$  on pandud tasapind. Avaldada püramiidi  $SABC$  ruumala.

7. Püramiidi kõrgus on  $h$  ja põhi on korrapärane kuusnurk küljega  $a$ . Missugusel kaugusel  $x$ , püramiidi tipust arvates, tuleb püramiidi lõigata põhjaga paralleelse tasapinnaga, et tekkinud tüvipüramiidi ruumala oleks  $V$ ?

8. Korrapärase tetraeedri serv on  $a$ . Avaldada ruumala.

9. Korrapärase oktaeedri serv on  $a$ . Avaldada ruumala.

10. Tüvipüramiidi ruumala  $V=1465$  cm<sup>3</sup>, tema põhjadeks on korrapärase kuusnurgad servadega  $a=23$  cm ja  $b=17$  cm. Arvutada selle tüvipüramiidi kõrgus.

11. Tüvipüramiidi ruumala  $V=10,5$  m<sup>3</sup>, kõrgus  $h=\sqrt{3}$  m ja tema alumiseks põhjaks oleva korrapärase kuusnurga külje  $a=2$  m. Arvutada ülemiseks põhjaks oleva korrapärase kuusnurga külje pikkus.

12. Kui kaugel püramiidi  $SABC$  tipust  $S$  tuleb võtta põhjaga paralleelne tasapind, et nende osade, milledeks see tasapind jaotab püramiidi, ruumalade suhe oleks  $m$ ?

13. Püramiid kõrgusega  $h$  on põhjaga paralleelsete tasapindadega jaotatud kolmeks osaks, kusjuures nende osade ruumalad suhtuvad nagu  $m:n:p$ . Avaldada nende tasapindade kaugused püramiidi tipust.

14. Kahe sarnase hulktahuka ruumalade summa on  $V$  ja vastavate servade suhe on  $m:n$ . Avaldada nende ruumalad.

15. Lõigata tüvipüramiid põhjadega  $S_1$  ja  $S_2$  paralleelse tasapinnaga kaheks niisuguseks osaks, mille ruumalad suhtuvad nagu  $m:n$ .

16. Leida sümmeetriakeskpunkt, -teljed ja -tasapinnad kujundile, mis koosneb tasapinnast ja teda kaldu lõikavast sirgest.

Vastus: sümmeetriakeskpunktiks on sirge ja tasapinna lõikepunkt; sümmeetriatasapinnaks osutub antud tasapinnaga ristuv ja antud sirget läbiv tasapind; sümmeetriateljeks on sirge, mis asetseb antud tasapinnas ja on risti antud sirgega.

17. Leida sümmeetriakeskpunkt, -teljed ja -tasapinnad kujundile, mis koosneb kahest lõikuvast sirgest.

Vastus: kujundil on kaks sümmeetriatasapinda ja kolm sümmeetriatelge (näidata millised).

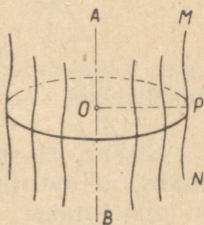
Neljas peatükk.

## ÜMARKEHAD.

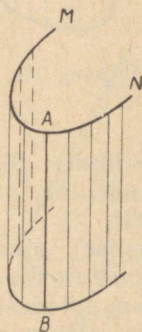
### I. SILINDER JA KOONUS.

**105. Pöörpind.** Pöörpinnaks nimetatakse pinda, mis tekib mingi **moodustajaks** nimetatava joone ( $MN$ , joon. 121) pöörlemisel liikumatu sirge ( $AB$ ) ümber, mida nimetatakse **teljeks**; seejuures eeldatakse, et moodustaja ( $MN$ ) on pöörlemisel muutumatult seotud teljega ( $AB$ ).

Võtame moodustajal mingi punkti  $P$  ja ehitame sellest teljele ristlõigu  $PO$ . On ilmne, et pöörlemisel ei muutu ei



Joon. 121.



Joon. 122.

selle ristlõigu pikkus, ei nurga  $AOP$  suurus ega ka punkti  $O$  asend. Seepärast moodustaja iga punkt joonestab ringjoone, mille tasapind on risti teljega  $AB$  ja mille keskpunktiks on selle tasapinna ja telje lõikepunkt.

Siit järeldub:

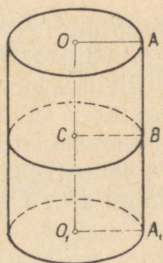
*teljega ristuva tasapinna ja pöörpinna lõikejoon on ringjoon.*

Iga lõiketapasapinda, mis läbib pöördpinna telge, nimetatakse **meridiaantasapinnaks** ja tema lõikejoont pöördpinnaga nimetatakse pöördpinna **meridiaaniks**. Kõik meridiaanid on kongruentsed, sest pöörlemisel igaüks neist läbib selle asendi, milles varem oli mõni teine meridiaan.

**106. Silindriline pind.** Silindriliseks pinnaks nimetatakse pinda, mille moodustab sirge ( $AB$ , joon. 122) liikudes ruumis nii, et ta jääb paralleelseks antud sirgega ja lõikab seejuures antud joont ( $MN$ ). Sirget  $AB$  nimetatakse **moodustajaks** ja joont  $MN$  **juhtjooneks**.



Joon. 123.



Joon. 124.

**107. Silinder.** Silindriks nimetatakse keha, mida piiravad silindriline pind ja kaks paralleelset tasapinda (joon. 123).

Silindrilise pinna osa, mis asetseb tasapindade vahel, nimetatakse silindri **külgpinnaks**, silindrilise pinnaga tasapindadest äralõigatud osi nimetatakse silindri **põhjadeks**. Põhjadevahelist kaugust nimetatakse silindri **kõrguseks**. Silindrit nimetatakse kas **püst-** või **kaldsilindriks** vastavalt sellele, kas moodustajad on põhjadega risti või kaldu.

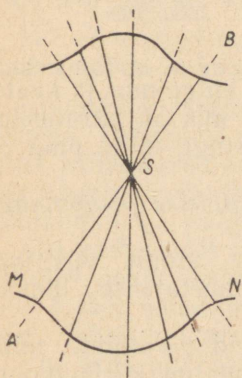
Püstsilindrit (joon. 124) nimetatakse **ringsilindriks**, kui tema põhjad on ringid. Säärast silindrit võib vaadelda kui keha, mis tekib ristküliku  $OAA_1O_1$  pöörlemisel külje  $OO_1$  kui telje ümber; külge  $AA_1$  kujundab seejuures külgpinna ning küljed  $OA$  ja  $O_1A_1$  — põhiringid. Iga sirglõik  $BC$ , mis on paralleelne lõiguga  $OA$ , kujundab samuti ringi, mille pind on risti teljega. Siit järeldub:

püstringsilindri lõige põhjadega paralleelse tasapinnaga on ring.

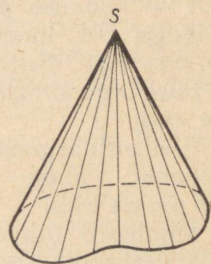
Elementaargeomeetrias käsitletakse ainult püstringsilindrit; lühiduse pärast nimetatakse teda lihtsalt silindriks.

Mõnikord tuleb käsitleda niisuguseid prismsid, mille põhjad on silindri põhjadesse kujundatud kõõlhulknurgad või silindri põhjade ümber kujundatud puutujahulknurgad, aga kõrgused on võrdsed silindri kõrgusega; sääraseid prismsid nimetatakse silindri sisse või silindri ümber kujundatud prismadeks.

**108. Kooniline pind.** Kooniliseks pinnaks nimetatakse pinda, mis tekib sirge ( $AB$ , joon. 125) liikumisel ruumis nii, et see sirge läbib liikumatut punkti ( $S$ ) ja lõikub antud joonega ( $MN$ ). Sirget  $AB$  nimetatakse **moodustajaks**, joont  $MN$  — **juhtjooneks** ja punkti  $S$  — **koonilise pinna tipuks**.



Joon. 125.

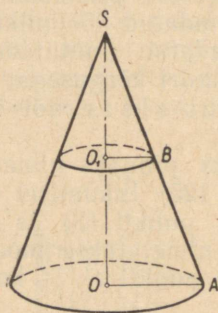


Joon. 126.

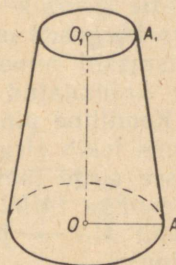
**109. Koonus.** Koonuseks nimetatakse keha, mida piiravad ühel pool tippu asetseva koonilise pinna osa ja tasapind, mis lõikab kõiki moodustajaid ühel ja samal pool tippu (joon. 126). Selle tasapinnaga piiratud koonilise pinna osa nimetatakse koonuse **kõlgpinnaks** ja koonilise pinnaga tasapinnast äralõigatud osa nimetatakse koonuse **põhjaks**.

Koonuse tipust põhitasapinnale tõmmatud ristlõiku nimetatakse koonuse **kõrguseks**.

Koonust nimetatakse **püstringkoonuseks**, kui tema põhi on ring ja kõrguse aluspunkt on põhja keskpunktiks (joon. 127). Säärast koonust võib vaadelda kui keha, mis tekib täisnurkse kolmnurga  $SOA$  pöörlemisel kaateti  $OS$  kui telje ümber.



Joon. 127.



Joon. 128.

Seejuures hüpotenuus  $SA$  kujundab külgpinna ja kaatet  $OA$  — koonuse põhja. Iga lõik  $BO_1$ , mis on paralleelne lõiguga  $OA$ , moodustab pöörlemisel ringi, mille pind on teljega risti. Siit järeldub:

*püstringkoonuse lõige põhjaga paralleelse tasapinnaga on ring.*

Elementaargeomeetrias käsitletakse ainult püstringkoonust, mida lühiduse pärast nimetatakse lihtsalt koonuseks.

Mõnikord tuleb käsitleda niisuguseid püramiide, mille põhjadeks on koonuse põhjasse kujundatud kõõlhulknurk või koonuse põhja ümber kujundatud puutujahulknurk ja mille tipp ühtib koonuse tipuga. Sääraseid püramiide nimetatakse koonuse sisse või koonuse ümber kujundatud püramiidideks.

**110. Tüvikoonus.** Tüvikoonuseks nimetatakse koonuse osa, mis asetseb põhja ja põhjaga paralleelse lõiketasapinna vahel.

Ringe, mida mööda paralleelsed tasapinnad lõikavad koonust, nimetatakse tüvikoonuse **põhjadeks**.

Tüvikoonust võib vaadelda kui keha (joon. 128), mis tekib täisnurkse trapetsi  $OAA_1O_1$  pöörlemisel trapetsi alustega ristuva haara  $OO_1$  ümber.

## Silindri ja koonuse pindala.

**111. Definitsioonid.** Silindri ja koonuse külgpinnad kuuluvad **kõverate** pindade hulka, s. o. niisuguste pindade hulka, mille ükski osa ei ühti tasapinnaga. Seepärast peame eriti defineerima, mida mõista silindri või koonuse külgpindala all, kui neid pindalasid võrreldakse t a s a s e pindala ühikuga. Edaspidi toetume järgmistele definitsioonidele:

1) *Silindri külgpindalaks loetakse silindri sisse kujundatud korrapärase prisma külgpindala piirväärtust selle prisma põhiservade arvu piiramatul suurenemisel (järelikult iga külgtahu pindala kahanemisel).*

2) *Koonuse (või tüvikoonuse) külgpindalaks loetakse koonuse (või tüvikoonuse) sisse kujundatud korrapärase püramiidi (või tüvipüramiidi) külgpindala piirväärtust põhiservade arvu piiramatul suurenemisel (järelikult iga külgtahu pindala kahanemisel).*

**112. Teoreem.** **Silindri külgpindala võrdub põhja übermöödu ja kõrguse korrutisega.**

Kujundame silindrisse (joon. 129) mingi korrapärase prisma. Tähistame selle prisma põhja übermöötu ja kõrgust väljendavad arvud tähtedega  $p$  ja  $h$ . Tema külgpindala väljendab siis korrutis  $p \cdot h$ . Kujutleme nüüd, et põhja kõõlhulknurga külgede arv piiramatult kasvab.

Siis übermööõt  $p$  läheneb piirväärtusele, mida loetakse silindri põhja übermöödu pikkuseks  $C$ , kuna aga kõrgus  $h$  jääb muutumatuks; seega prisma külgpindala, mis alati võrdub korrutisega  $p \cdot h$ , läheneb piirväärtusele  $C \cdot h$ . Seda piirväärtust loetaksegi silindri külgpindalaks. Tähistades silindri külgpindala tähega  $S$ , võime kirjutada:

$$S = C \cdot h.$$

**113. Järeldused.** 1) Kui  $R$  tähendab silindri põhja raadiust, siis  $C = 2\pi R$ , seepärast silindri külgpindala väljendub valemiga

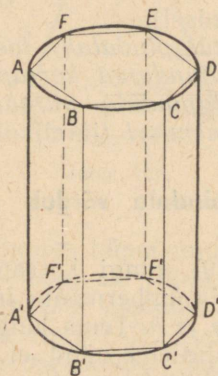
$$S = 2\pi R \cdot h.$$

2) Et saada silindri täispindala, tuleb külgpindalale lisada põhjade pindalade summa; seega, tähistades täispindala tähega  $T$ , saame:

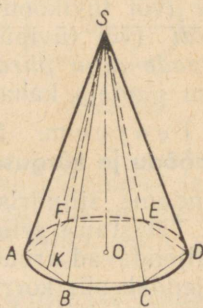
$$T = 2\pi R h + \pi R^2 + \pi R^2 = 2\pi R (h + R).$$

**114. Teoreem. Koonuse külgpindala võrdub põhja übermõõdu ja moodustaja poole korrutisega.**

Kujundame koonuse sisse (joon. 130) mingi korrapärase püramiidi ning tähistame selle püramiidi põhja übermõõdu ja külgtahu apoteemi tähtedega  $p$  ja  $l$ . Püramiidi külgpindala väljendub siis korrutisega  $\frac{1}{2}p \cdot l$ . Kujutleme nüüd, et põhja kõõlhulknurga külgede arv piiramalt kasvab; siis übermõõt  $p$  läheneb piirväärtusele, mida loetakse koonuse põhja übermõõdu pikkuseks  $C$ , kuna apoteemi  $l$  piirväärtuseks on koonuse moodustaja (sest kolmnurgast  $SAK$  järeldeb, et  $SA - SK < AK$ ); tähendab,



Joon. 129.



Joon. 130.

kui koonuse moodustaja tähistada tähega  $L$ , siis sissekujundatud püramiidi külgpindala, olles alati võrdne korrutisega  $\frac{1}{2}p \cdot l$ , läheneb piirväärtusele  $\frac{1}{2}C \cdot L$ . Seda piirväärtust loetaksegi koonuse külgpindalaks. Tähistades koonuse külgpindala tähega  $S$ , võime kirjutada:

$$S = \frac{1}{2}C \cdot L = C \cdot \frac{1}{2}L.$$

**115. Järeldused.** 1) Et  $C = 2\pi R$ , siis koonuse külgpindala väljendub valemiga:

$$S = \frac{1}{2} \cdot 2\pi R \cdot L = \pi RL.$$

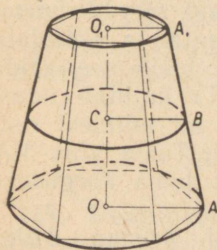
2) Koonuse täispindala saame, kui külgpindalaga liidame põhja pindala; seega, tähistades täispindala tähega  $T$ , saame:

$$T = \pi RL + \pi R^2 = \pi R(L + R).$$

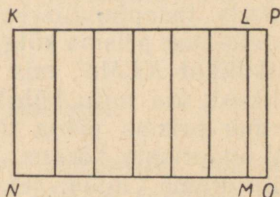
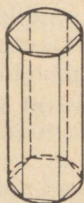
**116. Teoreem.** Tüvikoonuse külgpindala võrdub põhjade ümbermõõtude poolsumma ja moodustaja korutisega.

Kujundame tüvikoonuse sisse (joon. 131) mingi korrapärase tüvipüramiidi ning tähistame selle tüvipüramiidi põhjade ümbermõõdud ja külgtahu apoteemi tähtedega  $p$ ,  $p_1$  ja  $l$ . Siis sissekujundatud tüvipüramiidi külgpindala on  $\frac{1}{2}(p+p_1)l$ .

Sissekujundatud tüvipüramiidi külgtahkude arvu piiramatul kasvamisel ümbermõõdud  $p$  ja  $p_1$  lähenevad piirväärtustele, mida loetakse tüvikoonuse põhjade ümbermõõtude pikkusteks  $C$  ja  $C_1$ , kuna apoteemi  $l$  piirväärtuseks on tüvikoonuse moodustaja  $L$ . Järelikult sissekujun-



Joon. 131.



Joon. 132.

datud tüvipüramiidi külgpindala läheneb piirväärtusele  $\frac{1}{2}(C+C_1)L$ . Seda arvu loetaksegi tüvikoonuse külgpindalaks. Tähistades tüvikoonuse külgpindala tähega  $S$ , saame:

$$S = \frac{1}{2}(C + C_1)L.$$

**117. Järeldused.** 1) Kui  $R$  ja  $r$  tähendavad alumise ja ülemise põhja raadiusi, siis tüvikoonuse külgpindala on:

$$S = \frac{1}{2}(2\pi R + 2\pi r)L = \pi(R+r)L.$$

2) Kui trapetsis  $OO_1A_1A$  (joon. 131), mille pöörlemisel tüvikoonus tekib, võtame kesklõigu  $BC$  ja tähistame tema pikkuse tähega  $k$ , siis saame:

$$BC = \frac{1}{2}(OA + O_1A_1)$$

ehk

$$k = \frac{1}{2} (R + r),$$

millest leiame, et

$$R + r = 2k.$$

Seega:

$$S = 2\pi k \cdot L,$$

s. o.

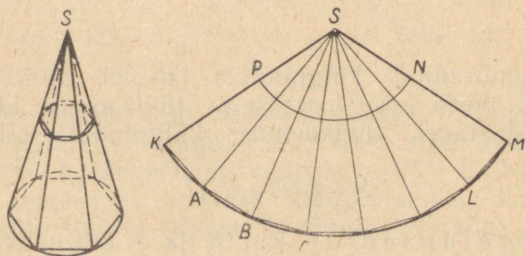
tüvikoonuse külgpindala võrdub kesklõike übermõõdu ja moodustaja korrutisega.

3) Tüvikoonuse täispindala  $T$  väljendub nii:

$$T = \pi(R^2 + r^2 + RL + rL).$$

**118. Silindri ja koonuse pinnalaotus.** Kujundame silindri sisse (joon. 132) mingi korrapärase prisma ja kujutleme seejärel, et tema külgpind on ühte külgserva mööda lahti lõigatud. On ilmne, et tahkusid servade ümber pöörates võime selle külpinna käristamata ja voltideta laotada tasapinnaliseks kujundiks. Siis tekib see, mida nimetatakse prisma **külgpinnalaotuseks**. Ta kujutab endast ristkülikut  $KLMN$ , mis on moodustatud nii mitmest ristkülikust, kui mitu külgtahku on prismal. Tema alus  $MN$  võrdub prisma põhja übermõõduga ja tema kõrguseks  $KN$  on prisma kõrgus.

Kujutame nüüd, et sissekujundatud prisma külgtahkude arv järjest suureneb; siis tema külgpinnalaotus



Joon. 133.

küll järjest pikeneb, kuid läheneb piir-ristkülikule  $KPON$ , mille alus on võrdne silindri põhja übermõõduga ja mille kõrguseks on silindri kõrgus. Seda ristkülikut nimetatakse silindri **külgpinnalaotuseks**.

Samal viisil kujutleme, et koonusesse on kujundatud mingi korrapärase püramiidi (joon. 133). Meie võime tema

külgservade ühte külgserva mööda ning seejärel tahkusi servade ümber pöörates saada külgservade tasapinnaliseks laotuseks hulknurkse sektori  $SKL$ , mis on moodustatud nii mitmest võrdhaarsest kolmnurgast, kui mitu külgtahku on püramiidil. Lõigud  $SK, SA, SB, \dots$  võrduvad püramiidi külgservaga (ehk koonuse moodustajaga) ning murdjoone  $KAB \dots L$  pikkus võrdub püramiidi põhja ümbermõõduga. Koonusesse kujundatud püramiidi külgtahkude arvu piiramatul suurenemisel tema pinnalaotus küll järjest suureneb, kuid läheneb piir-sektorile  $SKM$ , mille kaare  $KM$  pikkus võrdub koonuse põhja ümbermõõdu pikkusega ja raadius  $SK$  võrdub koonuse moodustajaga. Seda sektorit nimetatakse koonuse **külgservalaotuseks**.

Samal viisil võime saada tükikoonuse külgservalaotuse  $KMNP$  (joon. 133), mis kujutab endast rõnga osa. On kerge näha, et silindri ja koonuse külgservalaotuse pindala on võrdne vastava pinnalaotuse pindalaga.

### Silindri ja koonuse ruumala.

**119. Definiitsioonid.** 1) *Silindri ruumalaks loetakse silindrisse kujundatud korrapärase prisma ruumala piirväärtust selle prisma külgtahkude arvu piiramatul suurenemisel.*

2) *Koonuse (või tükikoonuse) ruumalaks loetakse koonusesse (või tükikoonusesse) kujundatud korrapärase püramiidi (või tüvipüramiidi) ruumala piirväärtust külgtahkude arvu piiramatul suurenemisel.*

**120. Teoreemid.** 1) **Silindri ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse korrutisega.**

2) **Koonuse ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse ühe kolmandiku korrutisega.**

Kujundame silindrisse mingi korrapärase prisma ja koonusesse mingi korrapärase püramiidi; tähistanud siis prisma või püramiidi põhja pindala tähega  $S_1$ , nende kõrguse tähega  $h$  ja ruumala tähega  $V_1$ , saame:

$$\begin{aligned} \text{prisma ruumala } V_1 &= S_1 h; \\ \text{püramiidi ruumala } V_1 &= \frac{1}{3} S_1 h. \end{aligned}$$

Kujutleme nüüd, et nii prisma kui ka püramiidi külgtahkude arv piiramatult suureneb. Siis suuruse  $S_1$  piir-

väärtuseks on silindri või koonuse põhja pindala  $S$ , nende kõrgus  $h$  jääb aga muutumatuks; tähendab korrutised  $S_1h$  ja  $\frac{1}{3}S_1h$  lähenevad piirväärtustele  $Sh$  ja  $\frac{1}{3}Sh$  ja seepärast silindri ja koonuse ruumalad on:

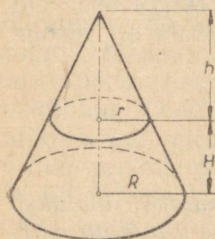
$$\begin{aligned} \text{silindri ruumala } V &= Sh; \\ \text{koonuse ruumala } V &= \frac{1}{3}Sh. \end{aligned}$$

121. Järeldus. Kui tähistada silindri või koonuse põhja raadius tähega  $R$ , siis  $S = \pi R^2$ ; seepärast:

$$\begin{aligned} \text{silindri ruumala } V &= \pi R^2 h; \\ \text{koonuse ruumala } V &= \frac{1}{3} \pi R^2 h. \end{aligned}$$

122. Teoreem. Tüvikoonuse ruumala võrdub kolme

niisuguse koonuse ruumala summaga, millede kõrgused on võrdsed antud tüvikoonuse kõrgusega ja millede põhjadeks on: esimesel — tüvikoonuse alumine põhi, teisel — ülemine põhi, kolmanda koonuse põhja pindala võrdub aga ülemise ja alumise põhja pindalade geomeetrilise keskmisega.



Joon. 134.

Seda teoreemi tõestame täiesti samal viisil, nagu tõestasime tüvipüramiidi ruumala teoreemi (§ 92).

Paigutame tüvikoonuse ülemisele põhjale (joon. 134) niisuguse koonuse (kõrgusega  $h$ ), mis täiendab antud tüvikoonuse täiskoonuseks. Siis võib tüvikoonuse ruumala  $V$  vaadelda nagu täiskoonuse ja täienduskoonuse ruumalade vahet. Seepärast:

$$V = \frac{1}{3} \pi R^2 (H + h) - \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{1}{3} \pi [R^2 H + (R^2 - r^2) h].$$

Kolmnurkade sarnasusest leiame, et:

$$\frac{R}{r} = \frac{H + h}{h},$$

millest saame:

$$Rh = rH + rh; (R - r)h = rH; h = \frac{rH}{R - r}.$$

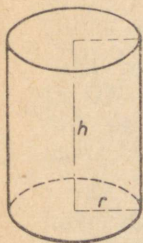
Seepärast:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3}\pi[R^2H + (R+r)rH] = \\ &= \frac{1}{3}\pi H(R^2 + Rr + r^2) = \\ &= \frac{1}{3}\pi R^2H + \frac{1}{3}\pi RrH + \frac{1}{3}\pi r^2H. \end{aligned}$$

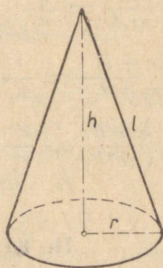
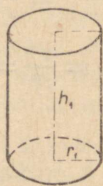
Et  $\pi R^2$  väljendab alumise põhja pindala,  $\pi r^2$  väljendab ülemise põhja pindala ja  $\pi Rr$  ehk  $\sqrt{\pi R^2 \cdot \pi r^2}$  on nimetatud põhjade pindalade geomeetiline keskmine, siis saadud valem on täiesti kooskõlas teoreemiga.

### Sarnased silindrid ja koonused.

**123. Definiitsioon.** Kahte silindrit või kahte koonust nimetatakse **sarnasteks**, kui nad on tekkinud sarnaste ristkülikute või sarnaste täisnurksete kolmnurkade pöörlemisel vastavate külgede ümber.



Joon. 135.



Joon. 136.

Olgu (joon. 135 ja 136)  $h$  ja  $h_1$  kahe sarnase silindri või kahe sarnase koonuse kõrgused,  $r$  ja  $r_1$  — nende põhjade raadiused ning  $l$  ja  $l_1$  — moodustajad; siis definiitsiooni põhjal:

$$\frac{r}{r_1} = \frac{h}{h_1} \text{ ja } \frac{r}{r_1} = \frac{l}{l_1},$$

millest (võrdsete suhete omaduste põhjal) leiame, et

$$\frac{r+h}{r_1+h_1} = \frac{r}{r_1} \text{ ja } \frac{r+l}{r_1+l_1} = \frac{r}{r_1}.$$

Silmas pidades neid võrdeid, tõestame järgmise teoreemi.

124. Teoreem. Sarnaste silindrite või sarnaste koonuste kül- ning täispindalad suhtuvad nagu raadiuste või kõrguste ruudud; ruumalad suhtuvad aga nagu raadiuste või kõrguste kuubid.

Olgu  $S$ ,  $T$  ja  $V$  vastavalt ühe silindri või ühe koonuse külgpindala, täispindala ja ruumala;  $S_1$ ,  $T_1$  ja  $V_1$  tähis- tagu teise sarnase silindri või teise sarnase koonuse vas- tavaid suurusid. Siis võime silindrite kohta kirjutada:

$$\frac{S}{S_1} = \frac{2\pi rh}{2\pi r_1 h_1} = \frac{rh}{r_1 h_1} = \frac{r}{r_1} \cdot \frac{h}{h_1} = \frac{r^2}{r_1^2} = \frac{h^2}{h_1^2};$$

$$\frac{T}{T_1} = \frac{2\pi r(r+h)}{2\pi r_1(r_1+h_1)} = \frac{r}{r_1} \cdot \frac{r+h}{r_1+h_1} = \frac{r^2}{r_1^2} = \frac{h^2}{h_1^2};$$

$$\frac{V}{V_1} = \frac{\pi r^2 h}{\pi r_1^2 h_1} = \frac{r^2}{r_1^2} \cdot \frac{h}{h_1} = \frac{r^3}{r_1^3} = \frac{h^3}{h_1^3}$$

ja koonuste kohta:

$$\frac{S}{S_1} = \frac{\pi rl}{\pi r_1 l_1} = \frac{r}{r_1} \cdot \frac{l}{l_1} = \frac{r^2}{r_1^2} = \frac{h^2}{h_1^2};$$

$$\frac{T}{T_1} = \frac{\pi r(r+l)}{\pi r_1(r_1+l_1)} = \frac{r}{r_1} \cdot \frac{r+l}{r_1+l_1} = \frac{r^2}{r_1^2} = \frac{h^2}{h_1^2};$$

$$\frac{V}{V_1} = \frac{\frac{1}{3}\pi r^2 h}{\frac{1}{3}\pi r_1^2 h_1} = \frac{r^2}{r_1^2} \cdot \frac{h}{h_1} = \frac{r^3}{r_1^3} = \frac{h^3}{h_1^3}.$$

## II. KERA.

### Kera tasapinnaline lõige.

125. Definitsioon. Keha, mis tekib poolringi pöörlemisel diameetri ümber, nimetatakse **keraks**, seejuures poolringjoone poolt moodustatud pinda nimetatakse **kera pinnaks** ehk **sfääriks**. Võib öelda, et see pind on ühest ja samast punktist (mida nimetatakse kera **keskpunktiks**) võrdsetel kaugustel asetsevate punktide geomeetriliseks kohaks.

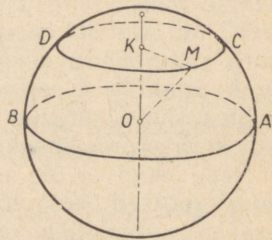
Lõiku, mis ühendab keskpunkti kera pinna mingi punkti- ga, nimetatakse kera **raadiuseks** ja kera pinna kahte punkti ühendavat lõiku, mis läbib keskpunkti, nimetatakse kera **diameetriks**.

Ühe ja sama kera raadiused on kõik võrdsed; iga dia- meeter võrdub kahe raadiuse summaga.

Kaks võrdsete raadiustega kera on kongruentsed, sest teineteise sisse paigutamisel nad ühtivad.

**126. Teoreem. Kera iga tasapinnaline lõige on ring.**

1) Oletame esiteks, et lõiketasapind  $AB$  (joon. 137) läbib kera keskpunkti  $O$ . Lõikejoone kõik punktid asetsevad kera pinnal ja on seepärast võrdsetel kaugustel punktist  $O$ , mis asetseb lõiketasapinnal; seega lõige on ring keskpunktiga punktis  $O$ .



Joon. 137.

2) Oletame nüüd, et lõiketasapind  $CD$  ei läbi keskpunkti. Ehitame kera keskpunktist lõiketasapinnale ristlõigu  $OK$  ning võtame kera ja tasapinna lõikejoonel mingi punkti  $M$ . Ühendades selle punktidega  $O$  ja  $K$ , saame täisnurkse kolmnurga  $MOK$ , millest leiame, et:

$$MK = \sqrt{OM^2 - OK^2}. \quad (1)$$

Et punkti  $M$  liikumisel mööda lõikejoont lõikude  $OM$  ja  $OK$  pikkused ei muutu, siis antud lõike puhul kaugus  $MK$  on jääv suurus; tähendab, lõikejoon on ringjoon, mille keskpunktiks on punkt  $K$ .

**127. Järeldused.** Olgu  $R$  ja  $r$  vastavalt kera ja lõikeringi raadiused ning  $d$  — lõiketasapinna kaugus keskpunktist; siis võrdus (1) omandab kuju:

$$r = \sqrt{R^2 - d^2}.$$

Sellest valemist järeldame:

1) Lõike raadius on suurim juhul, kui  $d=0$ , s. o. siis, kui lõiketasapind läbib kera keskpunkti. Sel juhul  $r=R$ . Saadud ringi nimetatakse sel juhul **suuringiks**.

2) Lõike raadius on väiksem juhul kui  $d=R$ . Sel juhul  $r=0$ , s. o. lõige taandub punktiks.

3) Kera keskpunktist võrdsetel kaugustel asetsevad lõiked on võrdsed

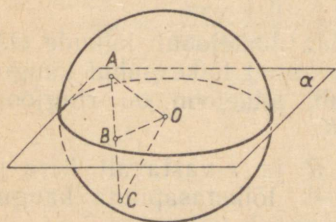
4) Kera keskpunktist mittevõrdsetel kaugustel asetsevaist lõikeist on suurem raadius sellel, mis asetseb keskpunktile ligemal.

128. Teoreem. Iga tasapind ( $\alpha$ , joon. 138), mis läbib kera keskpunkti, jaotab kera pinna kaheks sümmeetriliseks ja kongruentseks osaks.

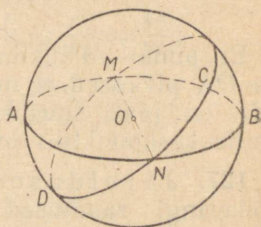
Võtame kera pinnal mingi punkti  $A$ ; olgu  $AB$  punktist  $A$  tasapinnale  $\alpha$  ehitatud ristlõik. Pikendame lõiku  $AB$  lõikumiseni kera pinnaga punktis  $C$ . Ehitades lõigu  $BO$  saame kaks kongruentset täisnurkset kolmnurka  $AOB$  ja  $BOC$  (kaatet  $BO$  on ühine ja hüpotenuusid on võrdsed kui kera raadiused); seega  $AB=BC$ . Nii vastab kera pinna igale punktile  $A$  selle pinna teine, punktiga  $A$  tasapinna  $\alpha$  suhtes sümmeetriline punkt  $C$ . Tähendab, tasapind  $\alpha$  jaotab kera pinna kaheks sümmeetriliseks osaks.

Need osad ei ole mitte ainult sümmeetrilised, vaid ka kongruentsed, sest lõiganud kera tasapinnaga  $\alpha$  kaheks osaks, võime ühe osa paigutada teisesse nii, et nad ühtivad.

129. Teoreem. Kera pinna kahte punkti, mis ei ole ühe diameetri otspunktideks, läbib üksainus suurringjoon.



Joon. 138.



Joon. 139.

Olgu kera pinnal, mille keskpunktiks on punkt  $O$  (joon. 139), võetud kaks mingit punkti, näiteks punktid  $C$  ja  $N$ , mis ei asetse ühel ja samal sirgel punktiga  $O$ . Siis punktid  $C$ ,  $O$  ja  $N$  määravad tasapinna. See tasapind, läbides keskpunkti  $O$ , lõikub kera pinnaga mööda suurringjoont.

Teist suurringjoont läbi punktide  $C$  ja  $N$  ei saa panna. Tõepoolest, definitsiooni põhjal peab iga suurringjoon asetsema kera keskpunkti läbival tasapinnal; järelikult, kui punkte  $C$  ja  $N$  läbiks veel teine suurringjoon, siis ilmneks, et kolm mitte ühel sirgel asetsevat punkti  $C$ ,  $N$  ja  $O$  määravad kaks erinevat tasapinda, mis on aga võimatu.

**130. Teoreem. Kaks lõikuvat suurringjoont poolitavad teineteist.**

Keskpunkt  $O$  (joon. 139), asetsedes mõlema suurringi tasapinnal, asetseb nende suurringide lõikesirgel; tähendab, sellel sirgel asetseb nii ühe kui teise ringi diameeter, kuid diameeter poolitab ringjoone.

### Kera puutujatasapind.

**131. Definiitsioon.** Tasapinda, millel on kera pinnaga üksainus ühine punkt, nimetatakse **puutujatasapinnaks**. Säärase tasapinna olemasolu võimalikkust näitab järgmine teoreem.

**132. Teoreem. Tasapind ( $\alpha$ , joon. 140), mis läbib kera pinna ühte punkti ja on risti sellesse punkti ehitatud raadiusega ( $OA$ ), on puutujatasapind.**

Võtame tasapinnal  $\alpha$  vabalt punkti  $B$  ja ühendame punktid  $O$  ja  $B$  sirglõiguga  $OB$ . Et sirglõik  $OB$  on tasapinna  $\alpha$  suhtes kaldu ja sirglõik  $OA$  on risti selle tasapinnaga, siis  $OB > OA$ . Seepärast punkt  $B$  asetseb väljaspool kera pinda; seega on tasapinnal  $\alpha$  kera pinnaga üksainus ühine punkt  $A$ ; tähendab, see tasapind on puutujatasapind.

**133. Pöördteoreem. Puutujatasapind ( $\alpha$ , joon. 140) on risti puutepunkti tõmmatud raadiusega ( $OA$ ).**

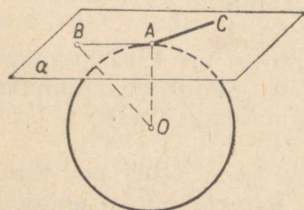
Et punkt  $A$  on definiitsiooni põhjal puutujatasapinna ja kera pinna ainus ühine punkt, siis selle tasapinna iga muu punkt asetseb väljaspool kera pinda ja asetseb seega keskpunktist kaugemal kui punkt  $A$ ; nii on lõik  $OA$  punkti  $O$  väikseim kaugus tasapinnast  $\alpha$ , s. o. lõik  $OA$  on risti tasapinnaga  $\alpha$ .

Sirget, millel on kera pinnaga üksainus ühine punkt, nimetatakse kera puutujaks. On kerge näha, et on olemas lõpmatu palju sirgeid, mis puudutavad kera antud punktis. Tõepoolest, iga sirge ( $AC$ , joon. 140), mis asetseb kera puutujatasapinnas ja läbib puutepunkti ( $A$ ), on kera puutujaks.

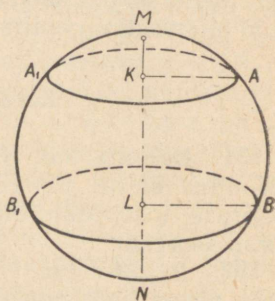
### Kera ja tema osade pindalad.

**134. Definiitsioonid.** 1) Kera pinnast mingi tasapinnaga ( $AA_1$ ) eraldatud osa (joon. 141) nimetatakse **segmendi pinnaks** e. sfääri segmendiks.

Ringjoont  $AA_1$  nimetatakse segmendi pinna **äärjooneks**, lõiketasapinnaga ristuva raadiuse lõiku  $KM$  nimetatakse segmendi pinna **kõrguseks**.



Joon. 140.



Joon. 141.

2) Kahe paralleelse lõiketasapinna ( $AA_1$  ja  $BB_1$ ) vahelist kera pinna osa nimetatakse kera **vööks**.

Lõikeringjooni  $AA_1$  ja  $BB_1$  nimetatakse vöö **äärjooneks** ja paralleelsete lõiketasapindade vahelist kaugust nimetatakse vöö **kõrguseks**.

Kera vööd ja segmendi pinda võib vaadelda kui pöördpindu: kui mingi poolringjoon  $MABN$  diameetri  $MN$  ümber pööreldes kujundab kera pinna, siis tema kaar  $AB$  kujundab vöö ja kaar  $MA$  kujundab segmendi pinna.

Kera ja tema osade pindalade leidmiseks tõestame järgmise lemma.

**135. Lemma.** Nii koonuse, tüvikoonuse kui ka silindri külgpindala võrdub keha kõrguse ja niisuguse ringjoone pikkuse korrutisega, mille raadiuseks on moodustaja keskpunkti teljeni tõmmatud moodustajaga ristuv lõik.

1) Tekkigu koonus (joon. 142) kolmnurga  $ABC$  pöörlemisel kaateti  $AC$  ümber. Kui punkt  $D$  on moodustaja  $AB$  keskpunkt, siis (§ 115):

$$\text{koonuse külgpindala} = 2\pi \cdot BC \cdot AD. \quad (1)$$

Võttes  $DE \perp AB$ , saame kaks sarnast kolmnurka  $ABC$  ja  $AED$  (nad on täisnurksed ja neil on ühine nurk  $A$ ); nende kolmnurkade sarnasusest järeldame, et:

$$BC : ED = AC : AD,$$

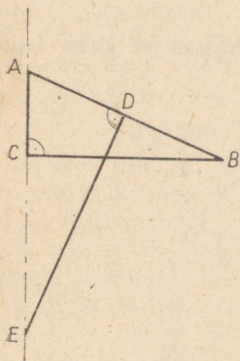
millest leiame, et:

$$BC \cdot AD = ED \cdot AC,$$

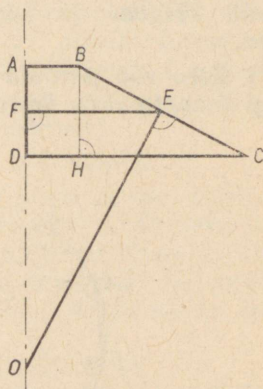
ning võrduse (1) põhjal saame:

$$\text{koonususe külgpindala} = 2\pi \cdot ED \cdot AC,$$

mida pidimegi tõestama.



Joon. 142.



Joon. 143.

2) Tekkigu tüvikoonus (joon. 143) trapetsi  $ABCD$  pöörlemisel külje  $AD$  ümber.

Võtnud kesklõigu  $EF$ , saame (§ 117):

$$\text{tüvikoonuse külgpindala} = 2\pi \cdot EF \cdot BC. \quad (2)$$

Tõmbame  $EO \perp BC$  ja  $BH \perp DC$ , siis saame kaks sarnast kolmnurka  $EFO$  ja  $BHC$  (ühe küljed on risti teise omadega); nende kolmnurkade sarnasusest järeldame, et:

$$EF : BH = EO : BC;$$

siit saame, et:

$$EF \cdot BC = BH \cdot EO = AD \cdot EO.$$

Seepärast võib võrduse (2) kirjutada nii:

$$\text{tüvikoonuse külgpindala} = 2\pi \cdot EO \cdot AD,$$

mida pidimegi tõestama.

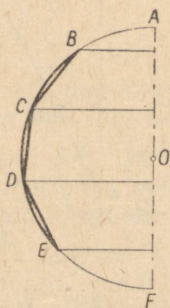
3) Teoreem jääb õigeks ka silindri kohta, sest teoreemis nimetatud sirglõik on võrdne silindri põhja raadiusega.

136. **Definitsioon.** Poolringjoone mingi kaare ( $BE$ , joon. 144) pöörlemisel diameetri ( $AF$ ) ümber tekkinud kera vöö pindalaks loetakse piirväärtust, millele läheneb sama diameetri ümber pöörleva korrapärase kõõlmurdjoone ( $BCDE$ ) poolt kujundatud pinna pindala, kui külgede arv piiramatult kasvab.

Seda definitsiooni laiendatakse ka segmendi pindala ja kera pindala jaoks; viimasel juhul hõlmab kõõlmurdjoont terve poolringjoon.

137. **Teoreemid.** 1) **Segmendi pindala võrdub segmendi kõrguse ja kera suurringi ümbermõõdu korrutisega.**

2) **Kera vöö pindala võrdub vöö kõrguse ja kera suurringi ümbermõõdu korrutisega.**



Joon. 144.



Joon. 145.

1) Ehitame kaaresse  $AF$  (joon. 145), mis pöörlemisel kujundab segmendi pinna, vabalt võetud külgede arvuga korrapärase murdjoone  $ACDEF$ .

Pind, mis tekib selle murdjoone pöörlemisel, koosneb külgede  $AC$ ,  $CD$ ,  $DE$  jne. poolt kujundatud osadest. Need osad on kas koonuse (külje  $AC$  kujundatud) või tüvikoonuse (külgede  $CD$ ,  $EF$ , ... kujundatud) või silindri (külje  $DE$  kujundatud, kui  $DE \parallel AB$ ) külgpindalad. Seejärest võime siin rakendada lemmat § 135. Seejuures paneme tähele, et iga moodustajaga ristuv lõik, mis on tõmmatud moodustaja keskpunktist teljeni, võrdub murd-

joone apoteemiga. Tähistades selle apoteemi tähega  $a$ , saame:

$$\begin{aligned} \text{külje } AC \text{ poolt kujundatud pinna pindala} &= AC' \cdot 2\pi a; \\ \text{„ } CD \text{ „ „ „ „ „ „} &= C'D' \cdot 2\pi a; \\ \text{„ } EF \text{ „ „ „ „ „ „} &= E'F' \cdot 2\pi a. \end{aligned}$$

Liitnud liikmeti need võrdused, leiame, et murdjoone  $ACDEF$  poolt kujundatud pinna pindala  $= AF' \cdot 2\pi a$ .

Kõõlmurdjoone külgede arvu piiramatul kasvamisel apoteemi  $a$  piirväärtuseks on kera raadius  $R$ , aga lõik  $AF'$  jääb muutumatuks; järelikult murdjoone  $ACDEF$  pöörlemisel kujundatud pinna pindala piirväärtuseks on  $AF' \cdot 2\pi R$ . Kuid murdjoone  $ACDEF$  pöörlemisel tekkinud pinna pindala piirväärtust loetakse segmendi pindalaks ja lõik  $AF'$  on segmendi kõrgus  $h$ , seepärast:

$$\text{segmendi pindala} = h \cdot 2\pi R = 2\pi Rh.$$

2) Oletame, et korrapärase murdjoon ei ole kujundatud mitte kaasesse  $AF$ , mille pöörlemisel tekib segmendi pind, vaid mingisse kaasesse  $CF$ , mille pöörlemisel tekib kera vöö (joon. 145). See muudatus, nagu näha, ei mõjuta mingil määral eelneva arutluse käiku, seepärast ka tulemus jääb samaks, s. o.:

$$\text{kera vöö pindala} = h \cdot 2\pi R = 2\pi Rh,$$

kus tähega  $h$  on nüüd tähistatud kera vöö kõrgust  $C'F'$ .

**138. Teoreem. Kera pindala võrdub suurringi ümbermõõdu ja diameetri korrutisega.**

ehk kera pindala võrdub neljakordse suurringi pindalaga.

Poolringjoone  $ADB$  (joon. 145) pöörlemisel tekkinud kera pindala võib vaadelda kui kaarte  $AD$  ja  $DB$  pöörlemisel tekkinud pindade summat. Seepärast võime eelneva teoreemi põhjal kirjutada:

$$\begin{aligned} \text{kera pindala} &= 2\pi R \cdot AD' + 2\pi R \cdot D'B = \\ &= 2\pi R (AD' + D'B) = 2\pi R \cdot 2R = 4\pi R^2. \end{aligned}$$

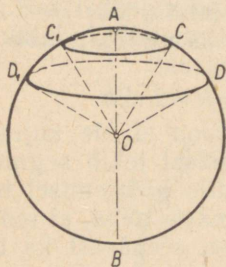
**139. Järeldus. Kerade pindalad suhtuvad nagu nende raadiuste või diameetrite ruudud, sest tähistades kerade raadiused tähtedega  $R$  ja  $R_1$  ning pindalad tähtedega  $S$  ja  $S_1$ , saame:**

$$\begin{aligned} S : S_1 &= 4\pi R^2 : 4\pi R_1^2 = R^2 : R_1^2 = 4R^2 : 4R_1^2 = \\ &= (2R)^2 : (2R_1)^2. \end{aligned}$$

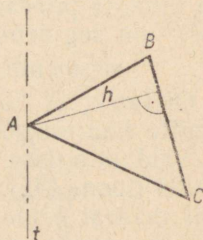
## Kera ja tema osade ruumalad.

**140. Definiitsioon.** Ringi sektori ( $COD$ , joon. 146) pöörlemisel tema kaarega mittelõikuva diameetri ( $AB$ ) ümber tekkinud keha nimetatakse **kera sektoriks**.

Seda keha piiravad kahe koonuse külgpinnad ja kera vöö pind. Viimast nimetatakse kera sektori **põhjaks**. Üks ringi sektorit piiravatest raadiustest võib ühtida pöörlemisteljega; näiteks sektor  $AOC$ , pööreldes telje  $AO$  ümber, kujundab kera sektori  $OCAC_1$ , mida piirab koonuse külgpind ja segmendi pind. Kera sektori ja kera ruumala leidmiseks tõestame algul järgmise lemma.



Joon. 146.



Joon. 147.

**141. L e m m a.** Kui  $\triangle ABC$  (joon. 147) pöörleb telje  $t$  ümber, mis asetseb kolmnurga tasapinnas ning läbib tippu  $A$  ja ei lõika külge  $BC$ , siis pöörlemisel tekkiva keha ruumala võrdub külje  $BC$  poolt kujundatud pinna pindala ja sellele küljele joonestatud kõrguse  $h$  ühe kolmandiku korrutisega.

Tõestamisel eristame kolm juhtu.

1) Telg ühtib küljega  $AB$  (joon. 148). Sel juhul otsitav ruumala võrdub täisnurksete kolmnurkade  $BCD$  ja  $DCA$  pöörlemisel tekkivate koonuste ruumalade summaga. Esimene ruumala on  $\frac{1}{3}\pi CD^2 \cdot DB$  ja teine on  $\frac{1}{3}\pi CD^2 \cdot DA$ ; seepärast kolmnurga  $ABC$  poolt kujundatud keha ruumala

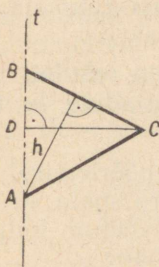
$$= \frac{1}{3}\pi CD^2 (DB + DA) = \frac{1}{3}\pi CD \cdot CD \cdot BA.$$

Korrutis  $CD \cdot BA$  võrdub korrutisega  $BC \cdot h$ , sest kumbki neist korrutistest väljendab kolmnurga  $ABC$  kahekordset pindala; seega:

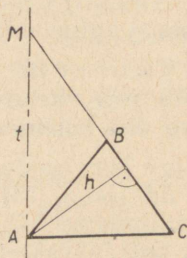
$$\text{ruumala } ABC = \frac{1}{3}\pi CD \cdot BC \cdot h.$$

Kuid korrutis  $\pi CD \cdot BC$  võrdub koonuse  $BDC$  külgpindalaga, tähendab:

$$\text{ruumala } ABC = (\text{pindala } BC) \cdot \frac{1}{3}h.$$



Joon. 148.



Joon. 149.

2) Telg ei ühti küljega  $AB$  ega ole paralleelne küljega  $BC$  (joon. 149). Sel juhul otsitav ruumala võrdub kolmnurkade  $AMC$  ja  $AMB$  pöörlemisel tekkivate kehade ruumalade vahega. Esimesel juhul tõestatu põhjal:

$$\begin{aligned} \text{ruumala } AMC &= \frac{1}{3}h \cdot (\text{pindala } MC), \\ \text{ruumala } AMB &= \frac{1}{3}h \cdot (\text{pindala } MB); \end{aligned}$$

järelikult:

$$\begin{aligned} \text{ruumala } ABC &= \frac{1}{3}h \cdot (\text{pindala } MC - \text{pindala } MB) = \\ &= \frac{1}{3}h \cdot (\text{pindala } BC). \end{aligned}$$

3) Telg on paralleelne küljega  $BC$  (joon. 150). Siis otsitav ruumala võrdub ristküliku  $DEBC$  pöörlemisel tekkinud silindri ruumalaga, millest on lahutatud kolmnurkade  $AEB$  ja  $ACD$  poolt kujundatud koonuste ruumalade summa; esimene neist ruumaladest on  $\pi DC^2 \cdot ED$ ; teine ruumala on  $\frac{1}{3}\pi EB^2 \cdot EA$  ja kolmas on  $\frac{1}{3}\pi DC^2 \cdot AD$ . Pidades nüüd silmas, et  $EB = DC$ , saame:

$$\begin{aligned} \text{ruumala } ABC &= \pi DC^2 [ED - \frac{1}{3}(EA + AD)] = \\ &= \pi DC^2 (ED - \frac{1}{3}ED) = \frac{2}{3}\pi DC^2 \cdot ED. \end{aligned}$$

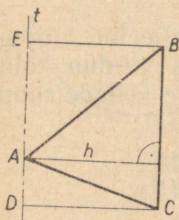
Korrutis  $2\pi CD \cdot ED$  väljendab külje  $BC$  poolt kujundatud silindri külginna suurust, seepärast:

$$\text{ruumala } ABC = (\text{pindala } BC) \cdot \frac{1}{3}DC = (\text{pindala } BC) \cdot \frac{1}{3}h.$$

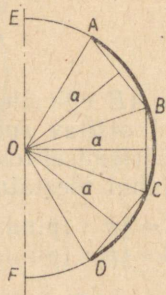
142. **Definitsioon.** Ringi sektori ( $AOD$ , joon. 151) pöörlemisel diameetri ( $EF$ ) ümber tekkiva kera sektori ruumalaks loetakse piirväärtust, millele läheneb sektori äärmiste raadiustega ( $OA$  ja  $OD$ ) ja sektori kaasesse kujundatud korrapärase murdjoonega ( $ABCD$ ) piiratud hulknurkse sektori pöörlemisel tekkiva keha ruumala, kui murdjoone külgede arv piiramatult kasvab.

143. **Teoreem.** Kera sektori ruumala võrdub vastava vöö (või vastava segmendi pinna) pindala ja kera raadiuse ühe kolmandiku korrutisega.

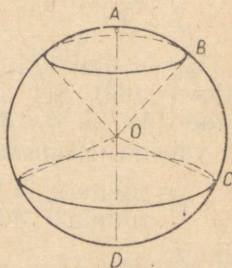
Tekkigu kera sektor ringi sektori  $AOD$  pöörlemisel diameetri  $EF$  (joon. 151) ümber. Avaldame ruumala  $V$ . Selleks kujundame kaasesse  $AD$  vabalt võetud külgede arvuga korrapärase murdjoone  $ABCD$ .



Joon. 150.



Joon. 151.



Joon. 152.

Hulknurkne sektor  $OABCD$  kujundab pöörlemisel mingi keha, mille ruumala tähistame tähega  $V_1$ . See ruumala on nende kehade ruumalade summa, mille kujundavad diameetri  $EF$  ümber pöörlemisel kolmnurgad  $OAB$ ,  $OBC$  ja  $OCD$ . Rakendame siin § 141 tõestatud lemmat, märkides seejuures, et kolmnurkade kõrgused võrduvad kõõlmurdjoone apoteemiga  $a$ . Vastavalt sellele lemmale saame:

$$V_1 = \frac{1}{3} (\text{pindala } AB) \cdot a + \frac{1}{3} (\text{pindala } BC) \cdot a + \dots = \frac{1}{3} (\text{pindala } ABCD) \cdot a.$$

Kujutleme nüüd, et murdjoone külgede arv piiramatult kasvab. Säärasel tingimusel on pindala  $ABCD$  piirväärtuseks kera vöö  $AD$  pindala, apoteemi  $a$  piirväärtuseks on raadius  $R$  ja  $V_1$  piirväärtuseks on  $V$ ; seega:

$$V = \frac{1}{3} (\text{vöö } AD \text{ pindala}) \cdot R.$$

Märkus. See teoreem ja tema tõestus ei sõltu sellest, kas üks ringi sektorit piirav raadius ühtib pöörlemiseljega või mitte.

**144. Teoreem. Kera ruumala võrdub tema pindala ja raadiuse ühe kolmandiku korrutisega.**

Tükeldanud poolringi  $ABCD$  (joon. 152), mis kujundab kera, mingiteks ringi sektoriteks  $AOB$ ,  $BOC$ ,  $COD$ , märkame, et kera ruumala võib vaadelda nende ringi sektorite pöörlemisel kujundatud kera sektorite ruumalade summana. Et eelmise teoreemi põhjal:

$$\text{ruumala } AOB = \frac{1}{3} (\text{pindala } AB) \cdot R,$$

$$\text{ruumala } BOC = \frac{1}{3} (\text{pindala } BC) \cdot R,$$

$$\text{ruumala } COD = \frac{1}{3} (\text{pindala } CD) \cdot R,$$

siis

$$\text{kera ruumala} = \frac{1}{3} (\text{pindala } AB + \text{pindala } BC + \\ + \text{pindala } CD) \cdot R = \frac{1}{3} (\text{pindala } ABCD) \cdot R.$$

Märkus. Kera ruumala võib vaadelda ka kui diameetri ümber pöörleva  $180^\circ$ -se ringi sektori kujundatud keha ruumala.

Säärasel juhul saadakse kera ruumala niisuguse kera sektori ruumalana, mille vöö pindala moodustab kogu kera pindala.

Eelmise teoreemi põhjal:

*kera ruumala võrdub tema pindala ja raadiuse ühe kolmandiku korrutisega.*

**145. Järeldus 1.** Tähistame kera vöö või segmendi pinna kõrguse tähega  $h$ , kera raadiuse tähega  $R$  ja diameetri tähega  $D$ ; siis vöö või segmendi pindala, nagu nägime (§ 137), väljendab avaldis  $2\pi Rh$  ja kera pindala (§ 138) väljendab avaldis  $4\pi R^2$ , seepärast:

$$\text{kera sektori ruumala} = \frac{1}{3} \cdot 2\pi Rh \cdot R = \frac{2}{3}\pi R^2 \cdot h;$$

$$\text{kera ruumala} = \frac{1}{3} \cdot 4\pi R^2 \cdot R = \frac{4}{3}\pi R^3$$

ehk

$$\text{kera ruumala} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{1}{6}\pi D^3.$$

Siit on näha, et kerade ruumalad suhtuvad nagu nende raadiuste või diameetrite kuubid.

Märkus. Kera ruumala valem võib tuletada (muide mitte täiesti rangelt) järgmise lihtsa arutluse teel. Kujutleme, et kogu kera pindala on tükeldatud väga väikesteks osadeks ja et iga osa piirjoone kõik punktid on raadiuste abil ühendatud kera keskpunktiga. Siis kera tükeldub väga suureks arvuks väikesteks kehadeks, milledest igaühte võib vaadelda kui püramiidi, mille tipuks on kera keskpunkt. Et püramiidi ruumala võrdub põhja pindala ja kõrguse (mille võib võtta võrdseks kera raadiusega) ühe kolmandiku korrutisega, siis kera ruumala, mis ilmselt võrdub kõikide püramiidide ruumalade summaga, väljendub nii:

$$\text{kera ruumala} = \frac{1}{3} S \cdot R,$$

kus  $S$  on kõikide püramiidide põhjade pindalade summa. Kuid see põhjade pindalade summa peab moodustama kera pindala, tähendab:

$$\text{kera ruumala} = \frac{1}{3} \cdot 4\pi R^2 \cdot R = \frac{4}{3} \pi R^3.$$

Nii võib kera ruumala valem tuletada tema pindala valem abil. Ümberpöörduvalt, kera pindala valem võib tuletada tema ruumala valem abil võrdusest:

$$\frac{1}{3} S \cdot R = \frac{4}{3} \pi R^3; \text{ siit } S = 4\pi R^2.$$

146. Järeldus 2. Kera pindala ja ruumala moodustavad vastavalt  $\frac{2}{3}$  kera ümber kujundatud silindri täispindalast ja ruumalast.

Tõepoolest, kera ümber kujundatud silindri põhja raadius võrdub kera raadiusega ja kõrgus võrdub kera diameetriga; seepärast: säärase

$$\text{silindri täispindala} = 2\pi R \cdot 2R + 2\pi R^2 = 6\pi R^2;$$

$$\text{silindri ruumala} = \pi R^2 \cdot 2R = 2\pi R^3.$$

Siit on näha, et  $\frac{2}{3}$  selle silindri täispindalast võrdub  $4\pi R^2$ , s. o. võrdub kera pindalaga, ja  $\frac{2}{3}$  silindri ruumalast moodustab  $\frac{4}{3} \pi R^3$ , s. o. kera ruumala.<sup>1</sup>

147. Märkus. Kera ruumala valem võib väga lihtsalt saada Cavalieri printsiibi (§ 89) põhjal järgmisel viisil.

Olgu ühele ning samale tasapinnale  $\alpha$  (joon. 153) paigutatud kera raadiusega  $R$  ja silinder, mille põhja raadius on  $R$  ja kõrgus on  $2R$  (tähendab, see on niisugune silinder, mida võib kujundada nimetatud kera ümber). Kujutleme edasi, et silindrist on välja õõnes-

<sup>1</sup> Selle lause tõestas Arhimedes (III sajandil e. m. a.). Arhimedes avaldas soovi, et selle teoreemi joonis tehtaks tema hauakivile, mis rooma sõjapealiku Marcelluse poolt ka teostati (F. Cajori, Elementaararvemaatika ajalugu).

Soovitame lugejatele kasuliku harjutusena tõestada, et kera pindala ja ruumala moodustavad  $\frac{2}{3}$  vastavalt kera ümber kujundatud koonuse täispindalast ja ruumalast, kui moodustaja võrdub põhja diameetriga. Ühenduses selle lause järeldusega 2 võime kirjutada niisuguse võrduse, milles täht  $Q$  tähistab kas pindala või ruumala:

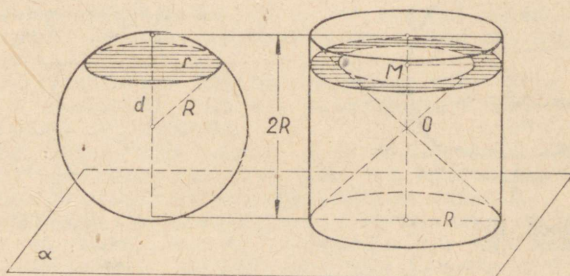
$$\frac{Q_{\text{kera}}}{4} = \frac{Q_{\text{silinder}}}{6} = \frac{Q_{\text{koonus}}}{9}.$$

tatud kaks koonust, millede ühine tipp asetseb silindri telje keskpunktis  $O$  ja millede põhjadeks on: ühel — silindri ülemine põhi, teisel — silindri alumine põhi. Silindrist jääb siis järele keha, mille ruumala, nagu kohe näeme, võrdub antud kera ruumalaga.

Võtame tasapinnaga  $\alpha$  mingi paralleelse tasapinna, mis lõikab mõlemat keha. Olgu selle tasapinna kaugus tema keskpunktist  $d$  ja olgu tasapinna ning kera lõikeringi raadius  $r$ . Siis selle ringi pindala on  $\pi r^2 = \pi(R^2 - d^2)$ . Sellesama tasapinna lõikumisel silindrist saadud kehaga tekib rõngas (mis joonisel on kriipsutatud), mille välimine raadius on  $R$  ja sisemine raadius on  $d$  (täisnurkne kolmnurk, mille moodustavad see raadius ja lõik  $OM$ , on võrdhaarne, sest tema kumbki teravnurk on  $45^\circ$ ). Tähendab, selle rõnga pindala on  $\pi R^2 - \pi d^2 = \pi(R^2 - d^2)$ . Nii näeme, et kera ja silindrist saadud keha lõiked tasapinna  $\alpha$  paralleeltasapinnaga on pindvõrdsed kujundid; järelikult vastavalt Cavalieri printsiibile nende kehade ruumalad on võrdsed. Kuid silindrist saadud keha ruumala on võrdne silindri ruumalaga, millest on lahutatud kahekordne koonuse ruumala, s. o. ta võrdub avaldisega

$$\pi R^2 \cdot 2R - 2 \cdot \frac{1}{3} \pi R^2 \cdot R = 2\pi R^3 - \frac{2}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R^3,$$

tähendab, see ongi kera ruumala.



Joon. 153.

**148. Definiitsioonid.** 1) Mingi tasapinnaga ( $CC'$ , joon. 154) kerast eraldatud osa ( $ACC'$ ) nimetatakse **kera segmendiks**. Lõikeringi nimetatakse segmendi **põhjaks** ja põhjaga risti asetseva raadiuse lõiku  $AM$  nimetatakse segmendi **kõrguseks**.

2) Kahe paralleelse lõiketäpinnaga ( $CC'$  ja  $DD'$ ) vahelist kera osa nimetatakse **kera kihiks**. Paralleelseid lõikeringe nimetatakse kihi põhjadeks ja nende vahelist kaugust  $MN$  kihi **kõrguseks**.

Mõlemat keha võib vaadelda kui mingi ringi osade  $AMC$  ja  $MCDN$  pöörlemisel diameetri  $AB$  ümber tekkinud kehasid.

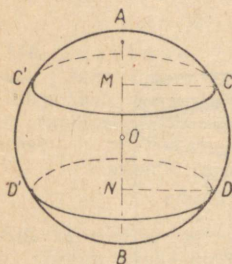
149. Teoreem. Kera segmendi ruumala võrdub  
 siisuguse silindri ruumalaga, mille põhja raadiuseks on  
 segmendi kõrgus ja mille kõrguseks on ühe kolmandiku  
 segmendi kõrguse võrra vähendatud kera raadius,

s. o.

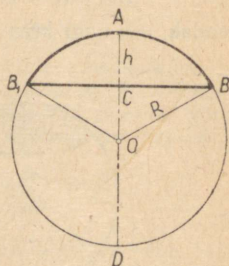
$$V = \pi h^2 \left( R - \frac{1}{3} h \right),$$

kus  $h$  on segmendi kõrgus ja  $R$  on kera raadius.

Ringi osa  $ACB$  (joon. 155) pöörlemisel diameetri  $AD$   
 ümber saadud kera segmendi ruumala leiame sel teel, et  
 ringi sektori  $AOB$  pöörlemisel tekkinud kera sektori ruum-  
 alast lahutame koonuse ruumala, mis tekib kolm-  
 nurga  $COB$  pöörlemisel. Esimene neist on  $\frac{2}{3} \pi R^2 h$  ja teine  
 on  $\frac{1}{3} \pi CB^2 \cdot CO$ . Et lõik  $CB$  on lõikude  $AC$  ja  $CD$  keskmise  
 võrdeline, siis  $CB^2 = h(2R - h)$ , seega:



Joon. 154.



Joon. 155.

$$\begin{aligned} CB^2 \cdot CO &= h(2R - h)(R - h) = \\ &= 2R^2h - Rh^2 - 2Rh^2 + h^3 = \\ &= 2R^2h - 3h^2R + h^3; \end{aligned}$$

järelikult:

ruumala  $ABB_1 =$  ruumala  $OBAB_1 -$  ruumala  $OBB_1 =$

$$\begin{aligned} &= \frac{2}{3} \pi R^2 h - \frac{1}{3} \pi CB^2 \cdot CO = \\ &= \frac{2}{3} \pi R^2 h - \frac{2}{3} \pi R^2 h + \pi R h^2 - \frac{1}{3} \pi h^3 = \\ &= \pi h^2 \left( R - \frac{1}{3} h \right). \end{aligned}$$

#### HARJUTUSI.

1. Põhja raadiusest kaks korda suurema kõrgusega silindri  
 ruumala on  $1 \text{ m}^3$ . Arvutada silindri kõrgus.

2. Tüvikoonuse põhjade raadiused on 27 cm ja 18 cm ning moo-  
 dustaja on 21 cm. Arvutada tüvikoonuse külgpindala ja ruumala.

3. Missugusel kaugusel keskpunktist peab tasapinnaga lõikama kera, mille raadius on 2,425 m, et väiksema segmenti pindala ja niisuguse koonuse külgpindala suhe, millel on segmentiga ühine põhi ja mille tipuks on kera keskpunkt, on 7:4?

4. Avaldada niisuguse pöördekeha ruumala, mis tekib korrapärase kuusnurga pöörlemisel tema külje  $a$  ümber.

5. Arvutada kuubi ümber kujundatud kera raadius, kui kuubi serv on 1 m.

6. Avaldada niisuguse pöördekeha ruumala, mis tekib võrdkülgse kolmnurga pöörlemisel telje ümber, mis läbib üht tippu ja on vastasküljega paralleelne, kui kolmnurga külg on  $a$ .

7. On antud võrdkülgne  $\triangle ABC$ , mille külg on  $a$ ; küljele  $BC$  ehitatakse ruut  $BCDE$ , mis asetseb väljaspool kolmnurka. Viisnurk  $ABEDC$  pöörleb külje  $AB$  ümber. Avaldada pöördekeha ruumala.

8. On antud ruut  $ABCD$ , mille külg on  $a$ . Läbi tipu  $A$  on joonestatud diagonaaliga  $AC$  ristuv sirge  $AM$  ja selle sirge ümber pööratakse ruutu. Avaldada pindala, mille kujundab ruudu piirdejoon, ning ruumala, mille kujundab ruudu pind.

9. On antud korrapärane kuusnurk  $ABCDEF$ , mille külg on  $a$ . Läbi tipu  $A$  joonestatakse raadiusega  $OA$  ristuv sirge  $AM$  ja selle ümber pööratakse kuusnurka. Avaldada kuusnurga poolt kujundatud keha pindala ja ruumala.

10. Kerasse, mille raadius on 2, on puuritud silindriline auk piki diameetrit. Arvutada ülejäänud ruumala, kui silindrilise augu raadius on 1.

11. Kera, paigutatuna koonilisse lehtrisse, mille põhja raadius  $r=5$  cm ja moodustaja  $l=13$  cm, puudutab lehtri äärjoone tasapinda. Arvutada kera ruumala.

12. Ringi ümber, mille raadius on 2, on kujundatud võrdkülgne kolmnurk. Leida kehade ruumalade suhe, mis tekivad ringi ja kolmnurga pindalade pöörlemisel kolmnurga kõrguse ümber.

13. Silindrilisse nõusse, mille põhja diameeter on 6 cm ja kõrgus on 36 cm, on valatud vett poole kõrguseni. Kui palju tõuseb vee-pind nõus, kui asetada üleni vette kera, mille diameeter on 5 cm?

14. Oõnes raudkera, mille väline raadius on 0,154 m, ujub poolest saadik vees. Arvutada selle kera kesta paksus, teades, et raua erikaal on 7,7.

15. Marsi läbimõõt on pool Maa läbimõödust. Mitu korda on Marsi pindala ja ruumala väiksemad kui Maa pindala ja ruumala?

16. Jupiteri läbimõõt on Maa läbimõödust 11 korda suurem; mitu korda Jupiter ületab Maad pindala ja ruumala poolest?

## LISA.

### GEOMEETRIA AKSIOOMIDEST.

1. Geomeetria erineb teistest matemaatika harudest (algebra, aritmeetika) ainult temale omase iseärasusega. See iseärasus seisneb selles, et need teoreemid ja kujundite omadused, mida uuritakse geomeetrias, ei põhine mitte üksi arutluste real, vaid paljudel juhtumitel võivad olla ka otsese vaatluse objektiks; nende omaduste kehivust mitte ainult ei tõestata, vaid nad leiavad kinnitust ka nägemismeele abil. Nii võib võrdhaarse kolmnurga alusnurkade võrdsust või kahe vastavalt võrdsete külgedega kolmnurga võrdsust ja paljusid teisi kujundite omadusi otseselt näha.

Geomeetriliste objektide kaemuslikkus aitab avastada ja ette näha paljusid geomeetrilisi tõdesid enne nende tõestamist. Muistsetel egiptlastel (2000 aastat enne meie ajaarvamist) oli geomeetriliste kujundite otsene vaatlemine peamiseks vahendiks nende kujundite ühtedes või teistes omadustes veendumisel. Kuid säärane vahend oli kõlblik ainult lihtsamate geomeetriliste tõdede kindlaksmääramisel, ja just säärase tõdedega tegelesid egiptlased, kes kasutasid geomeetria kitsal praktilisel eesmärgil. Kuid juba praktiliste ülesannete rohkus ja komplitseeritus sundis õppima üha keerulisemate geomeetriliste kujundite omadusi ning selleks ei piisanud enam joonise lihtsast vaatlusest; tekkis vajadus rakendada üha komplitseeritumaid arutlusi.

Peale selle on keerulisemate geomeetriliste kujundite näitlikkus sageli väga petlik ja juhib mõnikord lausa valedele järeldustele.

Võib tuua palju näiteid sellest, kuidas joonise üldine kuju sisendab vale otsuse joonisel kujutatud kujundite vastastikuste asendite ja omaduste kohta. Sellel põhineb palju geomeetrilisi paradokse, mida meie siin ei hakka esitama.

Muistsed kreeklased, kes geomeetria said egiptlastelt, üldistasid üksikuid egiptlastele tuntud tõsiasju ning töötasid välja kindlakujulised arutlused, mille abil nad avastasid uusi geomeetrilisi tõdesid. Umbes 300 aastat enne meie ajaarvamist andis kreeka matemaatik Eukleides oma raamatutes nimetusega «Elemendid» geomeetria esimese teadusliku aluse.

Ta püüdis võimalikult täpselt kirjeldada sääraseid lihtsamaid geomeetrilisi kujundeid, nagu punkt, joon, pind, ja nendevahelisi seoseid, mida selle ajani loeti endastmõistetavaks.

Tuginedes sellele, ta andis loogiliselt range geomeetria ülesehituse, mis oma vormilt nüüdisaegsegi teaduse vaatepunktist on ülimal määral täiuslik.

Ta taotles kõigepealt anda täpseid definitsioone geomeetrilistele põhimõistetele: punkt, joon, sirgjoon, pind, tasapind ja geomeetiline keha. Toome siin tema poolt antud definitsioonid:

1. Punkt on see, millel ei ole osi.
2. Joon on laiuseteta pikkus.
3. Joone piirideks on punktid.
4. Sirgjoon on see, mis on asetatud kõigi oma punktide suhtes ühteviisi.
5. Pind on see, mis omab ainult pikkust ja laiust.
6. Pinna piirideks on jooned.
7. Tasapind on pind; mis on asetatud kõigi oma sirgjoonte suhtes ühteviisi.
8. Kehaks nimetatakse seda, mis omab pikkust, laiust ja kõrgust.
9. Keha piirideks on pinnad.

Nende definitsioonide eesmärgiks oli saavutada seda, et nime-tused «punkt», «sirge» jne. mitte ainult ei kutsuks esile kindlat visuaalset kujutlust, vaid ühtaegu sellega määraksid kindlaks ka vastava mõiste, millele tuginedes võis teha edaspidiseid loogilisi järeldusi. Ja kuigi need definitsioonid nüüdisaja teaduse seisukohalt ei ole täiuslikud, ometi vastasid nad täielikult toleaege teadusliku mõtlemise tasemele ja olid kujutlustelt mõistetele ülemineku esime-seks sammuks.

Nad olid kõigi järgnevate geomeetriliste teoste lähtepunktiks ja määrasid tee geomeetria edaspidiseks arenemiseks.

Kõik geomeetrias tunnetatud tõesd liigitas Eukleides kolme liiki: postulaadid, aksiomid ja teoreemid. Esimesse kahte liiki<sup>1</sup> kuulusid tähtsaimad tõesd, mis ei tekitanud minget kahtlusi, olid vahetult ilmsed ning võisid olla seepärast lähtelauseteks, milledest loogili-selt tuletati teised tõesd.

Kolmas liik lauseid — teoreemid — on tõesd, mille kehtivust peab tõestama, s. o. rea arutluste teel tuletama esimese kahe liigi tõesdest. Toome Eukleidesse postulaadid ja aksiomid.

a) **Postulaadid.** Nõutakse, et

- 1) igast punktist võib igasse teise punkti ehitada ühe sirgjoone;
- 2) sirglõiku ja kiirt võib pidevalt pikendada sirgjoont mööda;
- 3) mistahes punktist võib joonestada mistahes raadiusega ring-joone;

4) kõik täisnurgad on võrdsed;

5) kaks sirget lõikuvad teineteisega sealpool, kuspool nad kol-manda neid lõikava sirgega moodustavad lähisnurki, millede summa on väiksem kui kaks täisnurka.

b) **Aksiomid.**

- 1) ühe ja samaga võrdsed on omavahel võrdsed;
- 2) kui võrdsetega liita ühepalju, siis summad on võrdsed;
- 3) kui võrdsetest lahutada ühepalju, siis jäägid on võrdsed;
- 4) üksteisega ühtivad on võrdsed;
- 5) tervik on suurem kui tema osa.

---

<sup>1</sup> Missugune on põhimõtteline vahe ühtede ja teiste vahel, seda Eukleides ei näita, kuid postulaatidega on tal tavaliselt ikka seotud väide, et üht või teist konstruktsiooni on võimalik teostada.

Need Eukleidese aksioomid ja postulaadid olid sajandeid aluseks, millele ehitati kogu geomeetria.

2. Juba lähemad Eukleidese järglased pöörasid erilist tähelepanu Eukleidese viiendale postulaadile. See tõmbas endale tähelepanu oma sõnastuse keerulisusega ja sellega, et ta kehtivus ei olnud kaugeltki täiesti ilmne.

Viimane asjaolu põhjustas püüdeid postulaadi kehtivust üht- või teistviisi tõestada, s. o. järeldada teda teistest, mitte kahtlust äratavatest tõdedest. Viienda postulaadi tõestamise katsed kestsid enam kui 2000 aastat, kuid ei viinud, ja nagu hiljem selgus, ei võinudki viia positiivsele tulemusele. Onnustus vaid postulaati asendada teise, temaga samaväärse lausega, mis oli aga niisama silmanähtamatu ning mis ei järeldunud teistest geomeetrilistest aksioomidest ja postulaatidest.

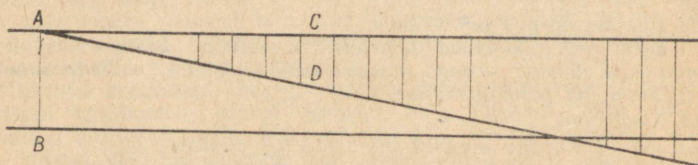
On kerge näidata, et Eukleidese postulaat on samaväärne väitega, et antud tasapinnas võib igast punkti igale sirgele joonestada üheainsa paralleelse sirge (s. o. antud sirgega mittelõikuva sirge). Tõepoolest, kui see oletus võtta aksioomiks, siis planimeetrias tõestatud teoreemidest järeldub otseselt Eukleidese postulaat. See lause ainsast paralleelsest sirgest võetaksegi harilikult aksioomiks Eukleidese postulaadi asemel (nagu seda on tehtud ka selle raamatu esimeses osas).

Teiseks Eukleidese postulaadiga samaväärseks lauseks on kolmnurga nurkade summa teoreem.

Matemaatikute pingutused olid mitme sajandi vältel sihitud sellele, et tõestada kas Eukleidese postulaati ennast või mõnd sellega samaväärset lauset.

Toome siin illustratsiooniks mõned säärased tõestused.

Proklose tõestus (V sajandil). Võtame antud tasapinnast sirge  $a$  ja väljaspool seda punkti  $A$  (joon. 156). Joonestame punkti  $A$  sirgele  $a$  ristlõigu  $AB$  ning punkti  $A$  joonestame sirgele  $AB$  ristsirge  $AC$ . Sirded  $a$  ja  $AC$  ei lõiku, sest vastasel korral oleks nende lõikepunktist sirgele  $AB$  joonestatud kaks ristsirget. Olgu nüüd läbi punkti  $A$  joonestatud veel mingi sirge  $AD$ . Proklos tõestab, et see sirge peab lõikuma sirgega  $a$ . Siin on tema tõestus.



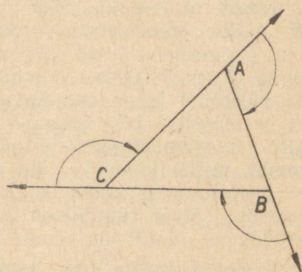
Joon. 156.

Hakkame joonestama sirge  $AC$  punktidest sellele sirgele ristlõike, pikendades neid kuni lõikumiseni sirgega  $AD$ . Ristlõigu aluspunkti kaugenedes punkti  $A$  tema pikkus kasvab, ning küllalt kaugel punkti  $A$  see pikkus saab suuremaks kui paralleelide  $a$

ja  $AC$  vaheline kaugus. Sirge  $AD$  vastavad punktid asetsevad niisiis teisel pool sirget  $a$ , nii et sirge  $AD$  läheb sirge  $a$  ühelt poolt teisele poole. Kuid see võib juhtuda ainult siis, kui ta lõikub sirgega  $a$ . Proklos toetub oma tõestuses oletusele, et ühe paralleelse sirge punktide kaugus teisest paralleelsest sirgest ei või piiramatult kasvada. Kuid see oletus on omakorda uus postulaat, mis on samaväärne Eukleidese postulaadiga.

Toome veel kolmnurga nurkade summa teoreemi tõestamise katse, mis ei rakenda paralleelsete sirgete omadusi. See tõestus on pärit

XIX sajandist ja kuulub Göttingeni ülikooli professorile Thibaut'le (I.: *tiboo*). Olgu antud  $\triangle ABC$  (joon. 157). Pikendame külge  $CA$  punktist  $A$ , külge  $AB$  punktist  $B$  ja külge  $BC$  punktist  $C$ . Tõestame, et sel teel tekkinud välisnurkade summa on  $360^\circ$ . Pöörame sirget  $AC$  punkti  $A$  ümber välisnurga  $A$  võrra. Pärast seda pööramist ühtib ta sirgega  $AB$ . Pöörame nüüd edasi seda sirget punkti  $B$  ümber tema uuest asendist välisnurga  $B$  võrra; pärast pööramist ühtib ta sirgega  $BC$ . Pöörame seda sirget nüüd tema viimasest asendist punkti  $C$  ümber välisnurga  $C$  võrra. Pärast kolme pööramist sirge tuleb oma esialgsesse asendisse. Järelikult, üldse pöördub ta täispöörde võrra, s. o.  $360^\circ$  võrra, kuid tema kolm pööret koosnesid kolmnurga kolme välisnurga suurustest pööretest. Järelikult on nende välisnurkade summa  $360^\circ$ . Kuid on ilmne, et kolmnurga kõigi välis- ja sisnurkade summa on  $3 \cdot 180^\circ$ , seega sisnurkade summaks osutub  $540^\circ - 360^\circ$  ehk  $180^\circ$ .



Joon. 157.

Selles tõestuses Thibaut teostas sirgega kolm pööret üksteisest erinevate punktide ümber ning eeldas vaikides, et säärane pööramine on samaväärne täispöördedega ühe keskpunkti ümber.

Niisugune oletus on omakorda teatav postulaat. Selle postulaadi lähem uurimine näitab, et ta on samaväärne Eukleidese postulaadiga.

Vaatamata Eukleidese postulaadi arvukate tõestamiskatsete ebaõnnestumisele, selle tõestamise katsed ei lakanud, ning selle põhjuseks oli matemaatikute täielik veendumus selles, et ilma selle postulaadita on geomeetria ülesehitus võimatu.

3. XIX sajandi esimesel poolel vene matemaatik, Kaasani ülikooli professor Nikolai Lobatševski, ungari matemaatik János Bolyai ja saksa matemaatik Karl Friedrich Gauss avaldasid julge mõtte, et Eukleidese postulaat ei ole geomeetria teiste aksiomide loogiline järeldus ning seepärast ei olegi võimalik teda tõestada ja et selle postulaadi tarvituselevõtmine ei ole geomeetria ülesehitamiseks vajalik.

Oma väite kinnitamiseks nad ehitasid uue geomeetria, milles Eukleidese postulaat oli asendatud teise oletusega, nimelt, et antud tasapinnal antud punktist võib joonestada kuitahes palju sirgeid, mis ei lõiku antud sirgega.

Selle geomeetria laused erinesid oluliselt Eukleidese geomeetria teoreemidest. Nii osutus kolmnurga nurkade summa väiksemaks kui  $360^\circ$ , kolmnurga kongruentsuse teoreemidele lisandus uus: «kolmnurgad on kongruentsed, kui kolm nurka on võrdsed kolme nurgaga teises». Seega selles geomeetrias ei ole kolmnurki, mis on sarnased, kuid ühtimatud.

Vaatamata uue geomeetria säärase lausete uudsusel, oli tal siiski harmooniline ja täiuslik kuju nagu Eukleidese geomeetrialgi. Hiljem hakati teda nimetama mitte-eukleiidiliseks geomeetriaks.

Uhtaegu mitte-eukleiidilise geomeetria avastamisega kerkis küsimus, milline geomeetria vastab tõelisele materiaalsele maailmale ja millist geomeetriat tuleb rakendada rakendusteaduste — füüsika, astronoomia jt. probleemide lahendamisel. Lobatševski ja Gauss püüdsid seda küsimust lahendada katselisel teel (Lobatševski — astronoomiliste vaatluste abil, Gauss — mõõtmise abil maapinnal; viimane mõõtis nurgamõõtmise riistade abil niisuguse kolmnurga nurkade summat, mille tippudeks olid üksteisest suurel kaugusel olevad mäetipud). Kuid selle küsimuse lahendamine lihtsate vahenditega osutus võimatuks. Meie ruumilised tajumised ei ole absoluutselt täpsed ja peegeldavad ainult ligikaudu materiaalse maailma ruumilisi suhteid.

Eukleidese geomeetria arenes tähelepanekutest materiaalses maailmas ja peegeldab seepärast suure täpsusega selles esinevaid seoseid, vähemalt nende lihtsamais avaldusis.

Lobatševski ja Gauss'i katsed ei andnud seepärast seatud küsimustele ammendavat vastust: nad ei leidnud märgatavaid kõrvalekaldumisi sellest, mida andis Eukleidese geomeetria, kuid nad ei saanud ka kindlaks teha selle geomeetria lausete ja materiaalse maailma ruumiliste suhete absoluutset vastavust.

Mitte-eukleiidilise geomeetria avastamine mõjutas sügavalt matemaatikute teadvust. Juba see tõsiasi, et on olemas harmooniline ja vasturääkivusteta mitte-eukleiidiline geomeetria, purustas sajandeid kestnud usalduse «kaemusse» ja «silmanähtavusse», mis juhtisid muistsete geomeetrite-matemaatikute mõtlemist. Viienda postulaadi sajanditepikkune analüüs pani vankuma geomeetriliste põhikujutluste alustoad, millel rajanes Eukleidese geomeetria. See analüüs avastas üksikute, näiliselt üksteisest kaugete geomeetriliste tõdede sügavad sõltumused ja näitas materiaalse maailma ruumilisi suhteid uues valguses.

Seepärast osutus Eukleidese aksiomide ja definitsioonide süsteem kui geomeetria üleschituse alus puudulikuks ja ei vastanud enam teadusliku ranguse kasvavaile nõudeile.

Säärane definitsioon, nagu näiteks «joon on laiusega pikkus», ei rahuldanud enam matemaatikuid, sest pikkuse ja laiuse mõisted ise kaotasid nende teadvuses selle absoluutse selguse ja aprioorsuse iseloomu, mis neil mõistetel oli Eukleidese ajal. Uue aja matemaatikud ei pidanud küllaldaseks mitmeid Eukleidese definitsioone ilma mõningate täiendusteta, mida ei olnud selgesti väljendatud, kuid vaikides ja märkamatuks tunnustati muistsete matemaatikute poolt. Teisiti on raske seletada, miks näiteks definitsiooni 4 ei tohi rakendada ringjoone puhul ning definitsiooni 7 silindri või koonuse pinna puhul.

Geomeetriliste definitsioonide ja aksiomide täiuslikkuse nõudlus viis selleni, et XIX sajandi lõpul seati üles kogu geomeetria aksio-

maatilise aluse revideerimise ja täpsustamise küsimus. Töödega sel alal loodi geometria uus aksiomaatika, mis täielikult vastab matemaatika nüüdisaegsele rangele nõudele.

Alamal anname lühikese ülevaate selle küsimuse nüüdisaja seisundi kohta.

4. Kõige esmalt seame küsimuse, kuidas defineerida geomeetrilisi põhikujundeid: punkti, sirgjoont ja tasapinda. Märgime, et defineerida mingit mõistet tähendab kirjeldada teda varem kindlaksmääratud mõistete abil. Kui aga otsida lihtsaimate mõistete definitsiooni, siis jõuame vältimatult ainult ühe nimetuse asendamisele teisega, mis omakorda nõuab defineerimist. Nii oli lugu ka Eukleidesega, kes mõistet «joon» defineeris «pikkuse» või «piiri» mõistete abil, jättes viimased defineerimata.

Seepärast võib algusest peale jätta defineerimata lihtsamad geomeetrilised mõisted ja võtta nad algmõisteteks, mida ei saa väljendada lihtsamate mõistete abil. «Punkt», «sirge» ja «tasapind» võetaksegi sellisteks ürgseteks, mittedefineeritavaks geomeetristeks mõisteteks. Vastavalt nendele määratakse terve põhioletuste, «aksiomide» süsteem, mida tunnustatakse tõestamatute lähtetõdedena. Oma olemuselt on need aksiomid materiaalse maailma ruumiliste seoste otstarbekohased abstraktsioonid.

Toome siin saksa matemaatiku Hilbert'i poolt loodud aksiomide süsteemi. Selle süsteemi geometria aksiomid liigitatakse 5 rühma.

Esimene rühm — «ühendamisaksiomid». Selle rühma aksiomide ülesandeks on kindlaks määrata mõistete punkt, sirge ja tasapind need suhted, mida harilikult iseloomustatakse sõnadega: «sirge läbib punkti», «punkt asetseb sirgel või tasapinnal» jne. See rühm koosneb järgmistest aksiomidest:

1. Kaks punkti määravad üheainsa neid läbiva sirge.
2. Igal sirgel asetseb vähemalt kaks punkti; on olemas vähemalt kolm punkti, mis ei asetse ühel sirgel.
3. Kolme mitte ühel sirgel asetsevat punkti läbib üksainus tasapind. Igas tasapinnas asetseb vähemalt üks punkt.
4. Kui sirge kaks punkti asetsevad ühel tasapinnal, siis selle sirge kõik punktid asetsevad samal tasapinnal.
5. Kui kahel tasapinnal on üks ühine punkt, siis on neil veel vähemalt üks ühine punkt.
6. On olemas vähemalt neli punkti, mis ei asetse ühel tasapinnal.

Esimesel pilgul mõned neist aksiomidest võivad näida puudulikud või üldse mittevajalikud. Näiteks aksiom 2 oleks nagu vastuolus hariliku kujutlusega sirgest, millel me kujutleme loendamatu hulka punkte. Kuid ei tohi unustada, et punkti ja sirge mõisted on siin tarvitusele võetud kui ürgsed teineteisest sõltumatud mõisted. Nad võivad esineda üksikult. Seepärast, kui me ütlesime, et punkt asetseb sirgel või et sirge läbib punkti, siis meie anname punktile ja sirgele omaduse olla teineteisega mingis ühenduses. Et selgemini ette kujutada säärast punktide, sirgete ja tasapindade olemasolu üksikult ja nendevahelisi seoseid, kujutleme neid kui konkreetseid füüsikalisi esemeid. Punkte kujutleme kui mingi kindla suurusega herneteri. Oletame, et need herneterad on kerakujulised ja küllalt pehmed (näiteks vees leotatud), et neid saab nõelaga läbi torgata ja tükki lüüa. Sirgeid kujutleme kui hästi peeni terasvardaid ja

tasapindu kui hästi õhukesi lesti. Esmalt kujutleme, et need lestad, vardad ja herneterad ei ole millegagi seotud ja et nad asetsevad koguni eri kohtades: ühes kohas kuhi herneid, teises — kimp terasvardaid ja kolmandas — virn lesti. Hakkame nüüd neid allutama nendele tingimustele, mida sisaldavad meie aksioomid. Meie ütleme, et punkt asetseb sirgel, kui varras on hernest läbi torgatud või vähemalt osaliselt tungib temasse. Meie ütleme, et punkt asetseb tasapinnal, kui õhuke lest lõikab hernetera pooleks või tungib ainult servaga herneterasse. Lõpuks ütleme, et sirge asetseb tasapinnal, kui peenike varras on lesta servaks, s. o. kui varras kogu ulatuses liibub lesta servale, ei ühele ega teisele poole välja ulatudes. Mida tähendavad neil tingimustel aksioomid? Nad nõuavad, et meie herneterad, vardad ja lestad asetseksid ruumis nii, et iga paar herneteri oleks läbi torgatud vähemalt ühe vardaga või oleks ühele vardale lükitud (aksioom 1); et iga varras läbiks vähemalt kahte hernetera (aksioom 2); et iga kolmik herneteri oleks ühe lestaga läbi lõigatud ja et iga lest läbiks vähemalt ühe hernetera (aksioom 3); et kui ühele vardale lükitud kaks hernetera mingi lestaga läbi lõigata, siis see lest lõikab kõiki herneteri, mis võiksid veel olla lükitud sellele vardale (aksioom 4); et kui kaks lesta lõikavad ühte ja sama hernetera, siis lõikavad nad veel vähemalt ühte hernetera (aksioom 5); et on olemas vähemalt neli hernetera, mida üks ja sama lest ei lõika (aksioom 6). Neile nõudeile peavad vastama meie herneterad, vardad ja lestad. Säärast hernetera, varraste ja lestade kombinatsiooni ei ole raske ehitada. Tõepoolest, eraldame lestadest virnast neli lesta. Lõikame neid servi mööda nii, et igaühel oleks kindla suurusega võrdkülgse kolmnurga kuju. Varraste kimbust võtame 6 varrast ja murrame otstest tükid ära nii, et kõik vardad oleksid võrdkülgse kolmnurga küljega ühepikkused. Edasi võtame 4 hernetera ja moodustame järgmise kujundi: 4 lestast koostame korrapärase tetraeedri; lestade servade liitekohtadele paigutame vardad ning tetraeedri tippudesse asetame herneterad nii, et lestade servad oleksid neile sisse lõigatud ja vardad otsapidi neisse torgatud.

See herneste, varraste ja lestade komplekt rahuldab kõiki ülimalt seatud nõudeid, s. o. vastab kõigile meie aksioomidele.

Sellest näitest nähtub, et 1. rühma aksioomidele vastavate punktide, sirgete ja tasapindade hulk võib olla lõplik. Meie näites on meil ainult 4 punkti, 6 sirget ja 4 tasapinda.

Teise rühma aksioomide — «järjestuse aksioomide» ülesandeks on selgesti väljendada need oletused, millele toetume, kui kõneleme ühest või teisest punktide järjestusest sirgel ja tasapinnal. Tähtsaks mõisteks on siin ühe punkti asetsemine sirgel kahe teise punkti vahel. Selle mõiste loogiline sisu väljendubki teise rühma aksioomides. Selle rühma aksioomid on järgmised:

1. Kui punkt *B* asetseb punktide *A* ja *C* vahel, siis *A*, *B* ja *C* on üksteisest erinevad sirgoone punktid ning *B* asetseb ka *C* ja *A* vahel.

2. Kui sirgel on antud kaks punkti *A* ja *B*, siis on sellel sirgel veel vähemalt üks punkt *C* nii, et *B* asetseb *A* ja *C* vahel.

3. Kolmest sirgel antud punktist ei asetse rohkem kui üks kahe teise vahel.

4. Kui antud tasapinnal on antud kolmnurk *ABC* ja mingi sirge *a*, mis ei läbi ühtegi kolmnurga tippu ja lõikub lõiguga *AB*, siis lõikub ta tingimata kas lõiguga *BC* või lõiguga *AC*.

Neis aksioomides esitatud nõudeid peavad rahuldama meie punktid, sirged ja tasapinnad. See tetraeedri tahkude, servade ja tippude komplekt, mis rahuldab 1. rühma aksioomide nõudeid, ei vasta enam 2. rühma aksioomidele. Tõepoolest, igale meie vardale oli lükitud ainult kaks hernest, kuna teise rühma 2. aksioom nõuab, et sirgel oleks vähemalt kolm punkti. Põhjalikum analüüs näitab, et igal sirgel peab asetsema loendamatu hulk punkte ning et 1. ja 2. rühma aksioome koosvõetult rahuldab ainult lõpmatu hulk punkte, sirgeid ja tasapindu.<sup>1</sup>

Kolmanda rühma aksioomide — «kongruentsi aksioomide» — ülesandeks on kindlaks määrata lõikude ja nurkade võrdsuse põhitingimused. See rühm sisaldab järgmisi aksioome:

1. Igale sirgele võib igast punktist paigutada antud lõiguga võrdse lõigu.

2. Kaks lõiku, mis on võrdsed kolmandaga, on omavahel võrdsed.

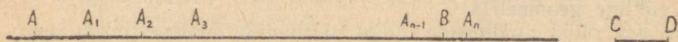
3. Olgu  $A, B, C$  punktid ühel sirgel ja  $A_1, B_1, C_1$  samuti punktid ühel sirgel ning olgu  $AB=A_1B_1, BC=B_1C_1$ ; kui lõikudel  $AB$  ja  $BC$  ning samuti lõikudel  $A_1B_1$  ja  $B_1C_1$  ei ole ühiseid punkte, siis  $AC=A_1C_1$ .

4. Antud sirge mistahes punktist võib selle sirge ühele või teisele poole ehitada ühe ja ainult ühe nurga, mis on võrdne antuga; iga nurk on võrdne iseenesega.

5. Kui kahes kolmnurgas  $ABC$  ja  $A_1B_1C_1$  küljed  $AB=A_1B_1, AC=A_1C_1$  ja  $\angle BAC=\angle B_1A_1C_1$ , siis  $\angle ABC=\angle A_1B_1C_1$ .

Paneme tähele viimast aksioomi.

Geomeetria õpikutes see aksioom esineb kolmnurkade kongruentsuse teise tunnuse järelalusena. Kuid kolmnurkade kongruentsus ise tõestatakse sel juhul pealepaigutamise teel ja eeldab seega kujundite ümberpaigutamise võimalust. Kuid säärane ümberpaigutamine moodustab omakorda mingi uue, seejuures meie süsteemi mittekuuluva aksioomi. Seepärast tulebki 5. lauset võtta kui uut aksioomi. Tema rakendamine asendab geomeetrias tarvitusel oleva kujundite ümberpaigutamise võtte.



Joon. 158.

Neljanda aksioomide rühma moodustab üksainus — «paralleelide aksioom». Seejuures paralleelsirgete olemasolu võimalus tõestatakse ilma uute aksioomideta. Seepärast aksioom nõuab ainsa paralleelsirge võimalust:

antud tasapinnal ei saa ehitada läbi antud punkti rohkem kui ühe sirge, mis ei lõiku antud sirgega. Sellest aksioomist kõnelesime juba eespool.

<sup>1</sup> Selle tõestus ei kuulu selle raamatu piiridesse.

Lõpuks viienda ja viimase aksiomide rühma moodustavad «pidevuse aksiomid». See rühm koosneb kahest aksiomist.

1. **Arhimedese aksiom.** Kui  $AB$  ja  $CD$  on mistahes lõigud, siis sirgel  $AB$  on olemas niisugune punktide hulk  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ , et  $AA_1 = A_1A_2 = A_2A_3 = \dots = A_{n-1}A_n = CD$  ja et  $B$  asetseb  $A_{n-1}$  ja  $A$  vahel (joon. 158).

2. **Sirge täielikkuse aksiom.** Sirge punktid moodustavad punktide süsteemi, millele ei saa lisada uusi punkte, mida võiks lugeda samale sirgele kuuluvateks, rikkumata varem ülesseatud aksiome.<sup>1</sup>

Esimene — Arhimedese aksiomi sisu on selge: aksiom nõuab, et sirge iga punktini, kui kaugel ta olekski märgitud, võib küündida. tehes lõpliku arvu võrdseid samme, ja et seega on võimalik mõita sirge iga punkti kaugust antud punktist. Seepärast seda aksiomi nimetataksegi mõnikord mõõtmise aksiomiks.

Vaatame, milles seisneb sirge täielikkuse aksiom.

Algebra kursusest on teada, et kui arvteljel märkida kõik ratsionaalsed abstsissidega punktid, siis sellega ei ole veel arvtelje kõik punktid ammutatud: nende punktidega üksi ei ole sirge veel pidevalt täidetud. Irratsionaalsete abstsissidega punktid on veel märkimata. Kui võetakse tarvitusele algebralised irratsionaalarvud igasuguste juurijatega ratsionaalarvude juurte ja ratsionaalsete kordajatega algebraliste võrrandite lahendite näol ja märgitakse nendele vastavad punktid arvteljel, siis arvtelg rikastub uute punktidega, millede abstsissid on irratsionaalsed. Kuid arvteljele jääb ikka veel tühje kohti, kuhu võib paigutada veel uusi punkte. Nii näiteks on arvteljel märkimata punktid abstsissidega  $\pi$ ,  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\frac{\pi}{3}$ ,  $\sqrt{\pi}$  jne. Arvtelg täitub alles siis,

kui võetakse tarvitusele kõik reaalarvud. Pärast seda ei saa sinna enam uut punkti paigutada. Sirgel ei ole enam tühja kohta. Täielikkuse aksiom nõuab, et geomeetrilisel sirgel oleks nimelt see olemas: et temas ei oleks tühja kohta, kuhu võiks paigutada uue punkti.

Sellest aksiomist järeldub, et igale reaalarvule vastab valitud abstsisside lugemise alguse ja ühiku ning suuna puhul kindel sirgjoone punkt ja ümberpöörduvalt — igale sirge punktile vastab kindel reaalarv.

Säärane on aksiomide loetelu, millel praegusel ajal baseerub eukleidiline geomeetria.

5. Kui nüüd analüüsida kogu elementargeomeetria kursust, siis märkame, et üheski tõestuses meie ei toetunud muule kui ülaltoodud aksiomide süsteemile. Mõned meie oletused, nagu paralleelide aksiom ja mõned ühendamisaksiomid, olid sõnades otse väljendatud, teisi rakendasime vaikides kui endastmõistetavaid. Kongruentsi aksiomid asendasime oletusega, et kujundeid on võimalik ruumis ümber paigutada. Kuid see oletus ise, nagu näitab tema põhjalikum analüüs, on komplitseeritud aksiom, mis on samaväärne kongruentsi aksiomide rühmaga.

---

<sup>1</sup> Täpsemalt: rikkumata kahte esimest ühendamisaksiomi, järjestuse aksiome, esimest kongruentsi aksiomi ja Arhimedese aksiomi.

## Sisukord.

### Stereomeetria.

|                      |   |
|----------------------|---|
| Eelmärkusi . . . . . | 3 |
|----------------------|---|

#### Esimene peatükk.

##### Sirged ja tasapinnad.

|   |    |
|---|----|
| I. Tasapinna asendi määramine . . . . .   | 3  |
| II. Paralleelsed sirged ja tasapinnad . . . . .   | 6  |
| Paralleelsed sirged . . . . .   | 6  |
| Sirge ja tasapinna paralleelsus . . . . .   | 7  |
| Paralleelsed tasapinnad . . . . .   | 8  |
| Konstruktsioonülesandeid . . . . .  | 10 |
| III. Tasapinna rist- ja kaldsirged . . . . .  | 12 |
| IV. Sirgete ja tasapindade paralleelsuse ja ristseisude vaheline seos . . . . .                                       | 15 |
| Konstruktsioonülesandeid . . . . .  | 18 |
| V. Kahetahulised nurgad, sirge ja tasapinna vaheline nurk, kiivsirgete-vaheline nurk, mitmetahulised nurgad . . . . . | 21 |
| Kahetahulised nurgad . . . . .  | 21 |
| Risttasapinnad . . . . .  | 23 |
| Kahe kiivsirge vaheline nurk . . . . .  | 25 |
| Nurk sirge ja tasapinna vahel . . . . .   | 25 |
| Mitmetahulised nurgad . . . . .   | 27 |
| Kolmetahuliste nurkade võrdsuse lihtsaimad juhud . . . . .  | 30 |
| Harjutusi . . . . .   | 32 |
| Konstruktsioonülesandeid . . . . .  | 33 |

#### Teine peatükk.

|   |    |
|---|----|
| Punkti, lõigu ja kujundi ristprojektsioonid . . . . . | 34 |
|---|----|

## Kolmas peatükk.

### Hulktahukad.

|   |    |
|---|----|
| I. Rööptahukas ja püramiid . . . . .                  | 48 |
| Rööptahuka tahkude ja diagonaalide omadused . . . . . | 52 |
| Püramiidi paralleelsete lõigete omadused . . . . .    | 53 |
| Prisma ja püramiidi külgpindala . . . . .             | 56 |
| Harjutusi . . . . .                                   | 57 |
| II. Prisma ja püramiidi ruumala . . . . .             | 58 |
| Rööptahuka ruumala . . . . .                          | 59 |
| Prisma ruumala . . . . .                              | 65 |
| Püramiidi ruumala . . . . .                           | 67 |
| III. Hulktahukate sarnasus . . . . .                  | 75 |
| IV. Korrapärase hulktahukad . . . . .                 | 77 |
| Korrapärase tetraeedri konstruktsioon . . . . .       | 79 |
| Oktaeedri konstruktsioon . . . . .                    | 80 |
| Dodekaeedri ja ikosaeedri konstruktsioon . . . . .    | 80 |
| V. Ruumiliste kujundite sümmeetria . . . . .          | 81 |
| Harjutusi . . . . .                                   | 87 |

## Neljas peatükk.

### Umarkehad.

|  |     |
|--|-----|
| I. Silinder ja koonus . . . . .          | 89  |
| Silindri ja koonuse pindala . . . . .    | 93  |
| Silindri ja koonuse ruumala . . . . .    | 97  |
| Sarnased silindrid ja koonused . . . . . | 99  |
| II. Kera . . . . .                       | 100 |
| Kera tasapinnaline lõige . . . . .       | 100 |
| Kera puutujatasapind . . . . .           | 103 |
| Kera ja tema osade pindalad . . . . .    | 103 |
| Kera ja tema osade ruumalad . . . . .    | 108 |
| Harjutusi . . . . .                      | 114 |
| Lisa. Geomeetria aksioomidest . . . . .  | 116 |

А. П. Киселёв  
ГЕОМЕТРИЯ II. СТЕРЕОМЕТРИЯ  
Учебник для 11-го класса средней школы  
На эстонском языке  
Оформление С. Лийберг  
Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

\*

Toimetaja K. Kallaste  
Kunstiline toimetaja H. Keigo  
Tehniline toimetaja I. Vahtre  
Korrektorid E. Kask ja E. Toots.

Ladumisele antud 5. X 1961. Trükkimisele antud  
3. XI 1961. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 8. For-  
maadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 6,56. Arvu-  
tuspoognaid 6,7. Trükiarv 5000. Tellimise nr. 8708.

Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu,  
Olikooli 17/19. III.

Hind 14 kop.

• 6—6









14 kop.

A-24157

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00445458 5