

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Pedagoška matematika

Terezija Krečič

**ORIGAMI KONSTRUKCIJE IN REŠEVANJE
ENAČB S PREPOGIBANJEM PAPIRJA**

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Aleš Vavpetič

Ljubljana, 2025

Zahvala

Neobvezno. Zahvaljujem se ... (bom še dopisala)

Kazalo

1 Uvod	1
2 Evklidske in origami konstrukcije	3
2.1 Evklidovi postulati in evklidske konstrukcije	3
2.2 Origami konstrukcije	4
2.2.1 Origami operacije in origami konstrukcije	5
2.2.2 Zrcaljenje točke čez premico	11
2.3 Zakaj origami konstrukcije nadvladajo evklidske	13
2.3.1 Algebrski pogled na evklidske konstrukcije	13
2.3.2 Origami števila	17
2.3.3 Origami-konstruktibilnost pravilnih n -kotnikov	23
3 Prepogibanje lista različnih geometrijskih oblik	29
3.1 Nekaj kratkih in zanimivih konstrukcij za uvod	29
3.2 Hagovi izreki za prepogibanje kvadrata	33
3.2.1 Prvi Hagov izrek	34
3.2.2 Drugi Hagov izrek	36
3.2.3 Tretji Hagov izrek	38
3.3 Razdelitev daljice na n skladnih delov	39
3.4 X -pregibi	43
4 Reševanje nerešljivih starogrških problemov	47
4.1 Podvojitev kocke	47
4.2 Trisekcija kota	50
5 Pregibanje tangent na stožnice	56
5.1 Krožnica	56
5.2 Parabola	57
5.3 Elipsa	59
5.4 Hiperbola	61
6 Reševanje enačb	64
6.1 Reševanje kvadratne enačbe preko tangente na parabolo	65
6.2 Belochin postopek z Lillovo metodo	68
6.2.1 Reševanje kubične enačbe z Belochinim postopkom	68
6.2.2 Hatorijeva konstrukcija	74
6.2.3 Reševanje kvadratne enačbe z Lillovo metodo	75
6.3 Alperinova in Geretschlägerjeva metoda za reševanje kubičnih enačb .	76
6.4 Reševanje starogrških problemov preko reševanja enačb	77
6.5 Kubična in kvartična enačba v projektivni ravnini	77
7 Alhazenov problem	86
8 Zaključek	97
Literatura	99

Program dela

Mentor naj napiše program dela skupaj z osnovno literaturo. (**za dopisati**)

Osnovna literatura

1. Hull, T. C., *Origametry: mathematical methods in paper folding*, Cambridge University Press, 2020.
2. Martin, G. E., *Geometric constructions*, Springer New York, 1997.
3. Geretschläger, R., *Euclidean constructions and the geometry of origami*, Mathematics Magazine **68**(5) (1995) 357–371, dostopno na <http://www.jstor.org/stable/2690924>.
4. Haga, K., *Origamics: mathematical explorations through paper folding*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008.
5. Nishimura, Y., *Solving alhazen's problem by origami*, International Journal of Geometry **7**(2) (2018) 37–42.

Podpis mentorja:

Origami konstrukcije in reševanje enačb s prepogibanjem papirja

POVZETEK

Prepogibanje papirja je v zadnjih petdesetih letih dobilo veliko vrednost v znanosti. Z ravnimi in enkratnimi prepogibi ter z njihovimi presečišči so določene premice in točke v modelu evklidske ravnine, vendar origamija ne povezujemo le z običajno evklidsko geometrijo. Z njim rešujemo različne probleme, ki izhajajo tudi iz področja algebре, teorije števil, projektivne geometrije, analize in še mnogo drugih. V nalogi bomo definirali množico origami števil in konstrukcije, ki jih lahko opravljamo s prepogibanjem papirja. Pogledali si bomo, kako lahko z origamijem rešujemo predvsem probleme, ki jih z evklidskim orodjem ne moremo, pri čemer je v ospredju vprašanje trisekcije kota in konstrukcije razdalje $\sqrt[3]{2}$. Spoznali bomo Hagove izreke, prepogibali tangente na stožnice, reševali enačbe tretje in četrte stopnje, na koncu pa še iz več zornih kotov spoznali optični Alhazenov problem in origami konstrukcijo njegove rešitve s pomočjo dualnih stožnic.

Origami constructions and equation solving by paper-folding

ABSTRACT

Paper folding has gained significant value in science over the last fifty years. With straight and single folds and their intersections, lines and points in the model of the Euclidean plane are defined, but origami is not only associated with conventional Euclidean geometry. It helps us solve various problems that stem also from areas like algebra, number theory, projective geometry, analysis, and many others. In this paper, we will define the set of origami numbers and constructions that can be performed through paper folding. We will examine how origami can help solve problems where Euclidean tools are powerless, focusing particularly on the question of angle trisection and the construction of the distance $\sqrt[3]{2}$. We will get to know Haga's theorems, fold tangents to conics, solve cubic and quartic equations, and finally, from various perspectives, learn about Alhazen's optical problem and the origami construction of its solution with help of dual conics.

Math. Subj. Class. (2020): 11R04, 11R11, 11R32, 51M05, 47L50, 11D41

Ključne besede: prepogibanje papirja, origami operacije, Belochin pregib, origami konstrukcije, origami števila, Hagovi izreki, trisekcija kota, podvojitve kocke, prepogibanje tangent na stožnice, Lillova metoda, reševanje enačb, dualne stožnice, Alhazenov problem

Keywords: paper folding, origami operations, Beloch's fold, origami constructions, origami numbers, Haga's theorems, angle trisection, doubling the cube, folding tangents to conics, Lill's method, equation solving, dual conics, Alhazen's problem

1 Uvod

Začnimo z odzivom mojih priateljev in sorodnikov, ko so izvedeli, da bom v svoji magistrski nalogi pisala o origamiju. Velika večina jih je bila zelo presenečena, saj si sploh ni predstavljala, da se v prepogibanju papirja skriva matematika. Kar je razumljivo, saj običajno ljudje, ki se s to kraljico znanosti po srednješolskem izobraževanju prenehajo aktivneje ukvarjati, njenega vpliva na vse okoli nas ne opazijo.

In resnica je, da se v origamiju razkriva toliko matematike, da je v tej nalogi ni bilo mogoče zajeti v celoti. Ne da se niti oceniti, kolikšen delež je tu opisan, saj se origami ne dotika le – že tako izjemno širokega – področja geometrije, temveč tudi analize, teorije števil, abstraktne algebре, diferencialne topologije ... Prav tako njegova uporaba zajema široko polje znanosti in inženirstva – od arhitekture in robotike do fizike in astrofizike, če naštejemo le nekaj primerov. Kdo bi si mislil, da lahko origami uporabimo za zlaganje šotorov in ogromnih kupol nad športnimi stadioni ali celo za pošiljanje solarnih objektov v vesolje [20, str. 3–5]?

Origami je umetnost prepogibanja papirja, ki se razvija že več kot tisočletje (trdnih dokazov o zlaganju papirja, kot ga poznamo danes, do pred letom 1600 po Kr. ni). Oblikovanje figur iz lista papirja se je do konca 20. stoletja hitro razširilo po vsem svetu [36]. Matematični vidik origamija je v ospredje prišel nekoliko kasneje. V 19. stoletju je nemški učitelj Friedrich Froebel (1782–1852) v prepogibanju papirja opazil visoko pedagoško vrednost in ga vlučil v svoj pouk osnovne geometrije v vrtcu. Indijski matematik Tandalam Sundara Row je leta 1893 izdal obsežno knjigo *Geometric Exercises in Paper Folding* [2], v kateri popisuje konstrukcije raznolikih geometrijskih likov in celo krivulj. Velik prelom je doseгла italijanska matematičarka Margherita P. Beloch, ki je v tridesetih letih 20. stoletja odkrila postopek, s katerim lahko preko prepogibanja papirja rešujemo celo kubične enačbe. Vseeno je preteklo še pol stoletja, da je origami začel zanimati tudi širšo znanost, od takrat pa se je na tem področju odprlo veliko priložnosti za raziskovanje koncepta origamija in njegovo uporabo v najrazličnejših strokah [20, str. 10].

V tej nalogi nas med drugim zanima tudi uporaba origamija v pedagoške namene. Prepričana sem, da lahko praktična izkušnja prepogibanja papirja za namen reševanja problemov učence bolj motivira, saj to ni običajna oblika dela pri pouku, hkrati pa zahteva spretnost in natančnost. Poleg fine motorike lahko z origamijem krepimo predvsem raziskovalno delo učencev ter odkrivanje in uporabo geometrijskih načel in pravil v praksi. V nalogi je vključenih veliko primerov, predvsem tistih iz geometrijskega področja, vendar še zdaleč ne bomo zajeli vsega, kar bi lahko v šoli s prepogibanjem papirja počeli.

Največja motivacija za nastanek te naloge je, da ni veliko literature v slovenškem jeziku, ki opisuje matematični pogled na origami. Moč je najti nekaj člankov, seminarских nalog ter diplomskejih in magistrskih del, strokovnih knjig v slovenščini iz tega področja pa nisem našla. Ta naloga zajema predvsem uporabo origamija za namene raziskovanja geometrije ter reševanja enačb in vključuje veliko slik z orisanimi konstrukcijami. Med drugim je namenjena uporabi pri pouku matematike ali matematičnem krožku. Opisane matematične teme so namreč dovolj enostavne, da se jih večinoma da predelati v eni šolski uri. Zato iskreno upam, da bo naloga koristila še kateremu pedagogu, ki bi si želel svoj pouk matematike popestriti na nov in zanimiv način.

Najprej bomo definirali ter poiskali povezavo in razliko med evklidskimi in origami konstrukcijami. S spustom na algebraično ozadje konstrukcij bomo dokazali, katera števila (oz. razdalje) in kateri pravilni n -kotniki so konstruktibilni z origamijem ter tako pokazali, da lahko z origamijem počnemo več kot samo z evklidskim orodjem. Spoznali bomo tudi konkretno konstrukcijo pravilnega sedemkotnika.

Nato bomo v roke prijeli liste papirja v obliki trikotnika, kvadrata ali pravokotnika ter spoznali nekaj osnovnih konstrukcij – od osnovnošolskega dokazovanja lastnosti geometrijskih likov do konstrukcije enakostraničnega trikotnika in pravilnega šest- in osemkotnika; pogledali si bomo vse tri Hagine izreke, s katerimi njihov avtor raziskuje, v kakšnem razmerju lahko z določenimi prepogibi razdelimo stranice kvadrata, potem pa bomo to posplošili na iskanje postopka razdelitve stranice na poljubno število enakih delov. Na kratko bomo spoznali tudi X -pregibe.

V naslednjem poglavju bomo po konstrukciji kvadratnega korena poljubnega števila spoznali več različnih origami postopkov, ki nam rešijo dva starogrška problema, nerešljiva z evklidskim orodjem – problem trisekcije kota ter podvojitve kocke, torej konstrukcije števila $\sqrt[3]{2}$.

Sledi kratko poglavje, v katerem spoznamo (ali osvežimo spomin), kako s prepogibanjem papirja točke na določeno premico ali krožnico konstruiramo tangente na vse štiri stožnice in s tem na papirju dobimo njihov obris.

Najbolj zanimivo in obsežno poglavje je reševanje enačb s prepogibanjem papirja. Tu spoznamo več metod, s katerimi lahko rešujemo splošne kvadratne in kubične enačbe ter celo nekatere enačbe četrte stopnje. V tem poglavju so zbrane metode in postopki več avtorjev, kot so Lill, Beloch, Alperin in Geretschläger, od katerih slednja dva rešitve enačb iščeta preko presečišč dualnih stožnic v projektivni ravnini.

Na koncu je predstavljen še optični Alhazenov problem, ki se ga da reševati tako na algebrski kot geometrijski način. Pogledali si bomo, kako lahko z origamijem preko dualne projektivne geometrije poiščemo točko odboja na sferičnem zrcalu, v kateri se svetlobni žarek iz ene izbrane točke odbije natanko v drugo izbrano točko.

Ker je naloga spisana z namenom morebitne uporabe pri pouku srednješolske (lahko tudi osnovnošolske) matematike, je v njej zajetih veliko tem, ki bi bile razumljive tudi bralcem, ki nimajo veliko znanja univerzitetne matematike. Vseeno se na nekaterih področjih dotaknemo tudi konceptov, ki dijakom načeloma niso znani, kot so npr. razširitve polj, projektivna geometrija in dualnost.

Zapustimo sedaj znano jezerce umetelno prepognjenih ladji in žerjavov ter se podajmo na širne vode globokega oceana matematičnega origamija.

Daj lektorirat Petri!

2 Evklidske in origami konstrukcije

Kraj in čas izvora origamija nista jasno določena. Nekateri viri zatrjujejo, da izhaja iz Japonske, drugi ga pripisujejo Kitajski, tretji se ne strinjajo z nobeno od teh dveh možnosti. Verjetno so umetnost zlaganja odkrili še pred izumom papirja, za katerega je leta 105 po Kr. poskrbel kitajski dvorni uradnik Cai Lun, saj se da npr. zlagati tudi robce iz blaga [36]. Je pa papir idealen material za zlaganje. Japonska beseda *origami* kot umetnost zgibanja papirja (“oru” – prepogibati, “kami” – papir) se je na Dalnjem vzhodu začela uporabljati proti koncu 19. stoletja.

Povečano zanimanje za origami v matematiki se je začelo v 2. pol. 20. stoletja in s seboj prineslo množično izhajanje literature o povezavi origamija z matematiko, fiziko, astronomijo, računalništvo, kemijo in še mnogimi drugimi vedami [46]. V angleščini je tako za matematično raziskovanje s prepogibanjem papirja nastalo poimenovanje “*origamics*”. V slovenščini uradnega prevoda še ni, Grahor pa v [12, str. 5] po zgledu angleških poimenovanj nekaterih znanstvenih disciplin (*mathematics* – matematika, *physics* – fizika itd.) predлага termin “origamika”.

2.1 Evklidovi postulati in evklidske konstrukcije

Preden si pogledamo, kaj lahko s prepogibanjem papirja konstruiramo, se spomnimo, na čem temelji evklidska geometrija. Za njenega očeta štejemo grškega matematika Evklida¹, ki je napisal zelo znano zbirkovo trinajstih knjig pod skupnim imenom *Elementi*. V njih obravnavana snov temelji na strogo logični izpeljavi izrekov iz definicij, aksiomov in postulatov². Še danes večina osnovno- in srednješolske geometrije izvira prav iz prvih šestih knjig Elementov.

V prvi knjigi Elementov je Evklid najprej definiral osnovne pojme – točka, premica, površina, ravnina, ravninski kot, pravi kot, ostri kot, topi kot, krog, središče kroga, premer, enakostranični in enakokraki trikotnik, kvadrat … ter nazadnje upejal še pojem vzporednih premic [16]. Nato je zapisal znamenitih pet postulatov, iz katerih izhaja vsa evklidska geometrija:

Postulat P1. Med dvema poljubnima točkama je mogoče narisati ravno črto.

Postulat P2. Vsako ravno črto je mogoče na obeh koncih podaljšati.

Postulat P3. Mogoče je narisati krožnico s poljubnim središčem in poljubnim polmerom.

Postulat P4. Vsi pravi koti so med seboj skladni.

Postulat P5. Če poljubni ravni črti sekamo s tretjo ravno črto (prečnico) in je vsota notranjih kotov na eni strani prečnice manjša od vsote dveh pravih kotov, potem se dani premici, če ju dovolj podaljšamo, sekata na tej strani prečnice.

¹O življenju tega aleksandrijskega učenjaka ne vemo nič gotovega, je pa zelo verjetno živel za časa prvega Ptolemaja (faraon v času 306–283 pr. Kr.) [3, str. 61].

²Aksiom je temeljna resnica ali načelo, ki ne potrebuje dokazov (oz. dokaz sploh ne obstaja) in vedno velja. Postulat je predpostavka oz. zahteva. Evklid med aksiomi in postulati ni postavil jasne razlike, Aristotel pa je postulat od aksioma ločil po tem, da gre pri prvem bolj za hipotezo kot temeljno resnico, vendar se njene veljavnosti ne dokazuje, temveč privzame kot veljavno [16, str. 122]. V primeru petega Evklidovega postulata se bomo spomnili, da nam to, ali ga privzamemo ali ne, poda različne geometrije. Danes med pojmom ne ločujemo [32, str. 2].

Opomba 2.1. Vemo že, da je postulat P5 ekvivalenten *aksiomu o vzporednicah*, ki pravi, da skozi dano točko, ki ne leži na dani premici, poteka natanko ena vzporednica k tej premici. Če ga predpostavimo, dobimo evklidsko geometrijo, sicer pa obstajajo še druge geometrije (npr. hiperbolična in sferna geometrija).

Definicija 2.2. *Evklidske konstrukcije* so konstrukcije točk, daljic, poltrakov, premic, krožnih lokov in krožnic, ki jih je iz danih točk in razdalj mogoče konstruirati le z uporabo t. i. *evklidskega orodja* – neoznačenega in neskončno dolgega ravnila (angl. *straightedge*) ter šestila, ki ne prenaša razdalj (ko ga dvignemo od podlage, se se njegova kraka zložita skupaj). Vsak korak konstrukcije izhaja iz zgornjih postulatov in je lahko eden od naslednjih postopkov:

- risanje premice skozi dve dani točki,
- risanje krožnice s središčem v dani točki, ki poteka skozi drugo dano točko,
- določitev nove točke kot presečišče dveh danih premic, dveh danih krožnic ali danih premice in krožnice.

Opomba 2.3. Da se pokazati, da lahko za konstrukcije ekvivalentno uporabimo tudi šestilo, ki prenaša razdalje [32, str. 6–7]. Zato imamo odslej z izrazom *šestilo* v mislih kar moderno šolsko šestilo.

Izkaže se, da z evklidskim orodjem ne moremo izvesti poljubnih konstrukcij – kot zelo znane protiprimere lahko tu naštejemo tri starogrške probleme. Pri *kvadraturi kroga* nam evklidsko orodje ne zmore konstruirati razdalje $\sqrt{\pi}$, pri *podvojitvi kocke* razdalje $\sqrt[3]{2}$, pri *trisekciji kota* ne zmore poljubnega kota razdeliti na tri enake dele. Drugi in tretji problem sta, verjetno za marsikoga presenetljivo, rešljiva z origamijem. V poglavju 4 si bomo pogledali njuni rešitvi, sedaj pa podrobneje spoznajmo še konstrukcije, ki jih dobimo s prepogibanjem papirja.

2.2 Origami konstrukcije

V nalogi se bomo omejili le na prepogibanje v ravnini in se z trodimenzionalni modeli ne bomo ukvarjali. Bralec je ob branju povabljen, da opisane konstrukcije v praksi preizkusiti tudi sam. Pri izbiri papirja je priporočljiv rahlo prosojen papir, skozi katerega se vidijo morebitne označbe točk in premic s svinčnikom (npr. navaden kuhinjski papir za peko).

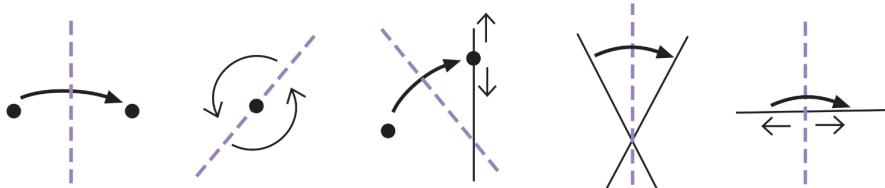
Bistvo origamija je, da prepogibamo list papirja. Zato je tudi naravno, da ga vzamemo za model evklidske ravnine. V njej si za modele premic vzamemo *ravne pregibe*, modeli točk pa naj bodo presečišča premic, tj. *presečišča pregibov*. Določimo še nekaj pravil:

- pregibe opravljamo po enega naenkrat, torej po vsakem pregibu papir nazaj razgrnemo,
- ne uporabljamo drugih orodij, kot so ravnilo, šestilo, škarje, lepilo ipd.,
- pisalo je dovoljeno le pogojno – z njim lahko označimo pomožne točke, za katere vemo, da jih znamo konstruirati z origamijem, ampak bi nam pomožni

pregibi zmanjšali preglednost konstrukcije (npr. zrcaljene točke, glej razdelek 2.2.2); prav tako lahko s pomočjo ravnila močneje poudarimo že konstrui-rane točke in premice.

Papir prepogibamo tako, da se objekti na njem (točke in premice) prekrijejo. Zato moramo na začetku imeti na listu že nekaj danih objektov (npr. dve različni točki ali premico in točko, ki ne leži na njej). Hull v [20, str. 24–26] navaja spodnji seznam vseh mogočih pregibov (po vrsti so prikazani na sliki 1):

- točko prepognemo na drugo točko (en možen pregib),
- točko prepognemo samo vase (neskončno možnih pregibov),
- točko prepognemo na premico (neskončno možnih pregibov),
- premico prepognemo na drugo premico (en ali dva možna pregiba) in
- premico prepognemo samo vase (neskončno možnih pregibov).



Slika 1: Vsi pregibi točk ali premic na točko ali premico. Vzeto iz [20, str. 25].

Vidimo lahko, da je pri nekaterih primerih pregibov neskončno možno in tega si ne želimo. Tako kot pri evklidskih konstrukcijah na primer ne dovolimo konstrukcij premic, ki potekajo skozi eno samo točko (šop premic), bomo tudi tu možne pregibe omejili na končno število možnosti. V ta namen sedaj definirajmo vse možne pregibe.

2.2.1 Origami operacije in origami konstrukcije

V zadnjem stoletju se je preko več matematikov (Jacques Justin, Peter Messer, Benedetto Scimemi, Humiaki Huzita, Koshiro Hatori, George E. Martin idr.; nekateri so med seboj sodelovali, drugi so delovali neodvisno) skozi čas izoblikoval seznam t. i. *origami operacij*. Gre za nekakšne “aksiome”³ o obstoju specifičnih prepogibov, ki zajamejo vseh pet možnosti prepogibanja iz zgornjega Hullovega seznama. Da so to zadostne operacije za katerokoli origami konstrukcijo, si bomo pogledali v razdelku 2.6.

Seznam se je med avtorji razlikoval v številu (gl. [20, str. 29–30]), kot končen seznam pa bomo tu navedli vseh osem naštetih – na prvi pogled različnih – operacij. Najprej jih naštejmo, potem pa si ob sledečih slikah še natančneje poglejmo konstrukcijo in pomen posamezne operacije. Videli bomo, da moramo pri nekaterih operacijah ločiti več primerov [24, 46]. Pregibi so na slikovnih prikazih označeni z rdečo prekinjeno črto.

³Seznam je bolj znan pod imenom *Huzita-Hatori aksiomi*, vendar izraz “aksiom” tu ni primeren, saj bomo kmalu pokazali, da se med seboj prepletajo in so nekateri izmed njih kombinacija drugih. Prav tako v tej nalogi v ime seznama ne vključimo imen avtorjev, ker se svoj del k seznamu prispevalo več drugih avtorjev.

Operacija O1. Za poljubni točki A in B obstaja natanko en pregib p , ki gre skoznju.

Operacija O2. Za poljubni premici lahko določimo njuno presečišče, če obstaja.

Operacija O3. Za poljubni točki A in B obstaja natanko en pregib p , da se točki pokrijeta.

Operacija O4. Za poljubni premici a in b obstaja pregib p , ki ju položi eno na drugo.

Operacija O5. Za poljubno točko A in premico a obstaja natanko en pregib p skozi točko A , ki je pravokoten na premico a .

Operacija O6. Za primerno izbrani točki A in B ter premico a obstaja pregib p skozi točko B , ki točko A položi na premico a .

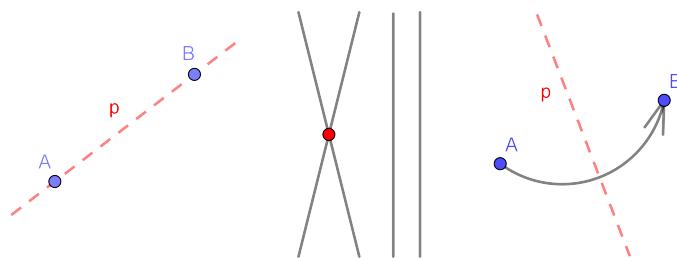
Operacija O7. Za primerno izbrani točki A in B ter premici a in b obstaja pregib p , ki točko A položi na premico a in točko B na premico b .

Operacija O8. Za poljubno točko A ter nevzporedni premici a in b obstaja pregib p , ki je pravokoten na premico b in točko A položi na premico a .

Vse operacije nam konstruirajo raven pregib (premico), le operacija O2 nam določa njihova presečišča (točke). Iz tu lahko smiselno definiramo origami konstrukcije.

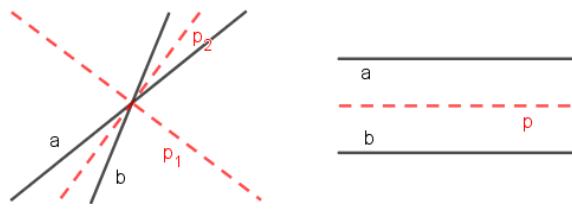
Definicija 2.4. *Origami konstrukcije* so konstrukcije točk in premic, ki jih je iz danih točk in razdalj mogoče konstruirati preko operacij O1–O8. Pri tem premico predstavlja raven in enkraten pregib iz posamezne operacije, nove točke pa so določene s presečišči teh pregibov.

Prve tri operacije so prikazane na sliki 2. Operacijo O1 izvedemo tako, da narredimo pregib skozi točki A in B . Takoj opazimo, da je ta operacija analogna postulatu P1, kar nam vzbudi zanimanje za povezavo med evklidskimi in origami konstrukcijami. Pri operaciji O2 ne prepogibamo papirja, temveč določamo presečišča pregibov. Operacija je očitno izvedljiva le v primeru nevzporednih pregibov. Pri operaciji O3 papir uvijemo, da se točki pokrijeta, nato pa z dlanjo sploščimo papir in ustvarimo pregib. Le-ta je ravno simetrala daljice AB – ko prepognemo točko A na točko B in pustimo papir še zapognjen, je očitno, da so vse točke na pregibu enako oddaljene od točk A in B .



Slika 2: Operacije (od leve proti desni) O1, O2 in O3.

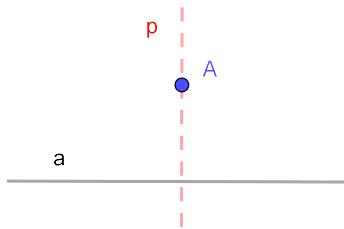
Operacijo O4 izvedemo tako, da premici položimo drugo na drugo. Očitno mora njuno presečišče (če sta nevzporedni) ležati na pregibu. Opazimo, da nam operacija O4 konstruirira obe simetrali kota, ki ga določata premici in njuno presečišče, v



Slika 3: Operacija O4 v obeh možnih primerih.

primeru vzporednih premic pa dobimo tretjo vzporednico, ki leži na sredi med njima (slika 3). Zato sta tu možna po dva ali, v posebnem primeru, en pregib.

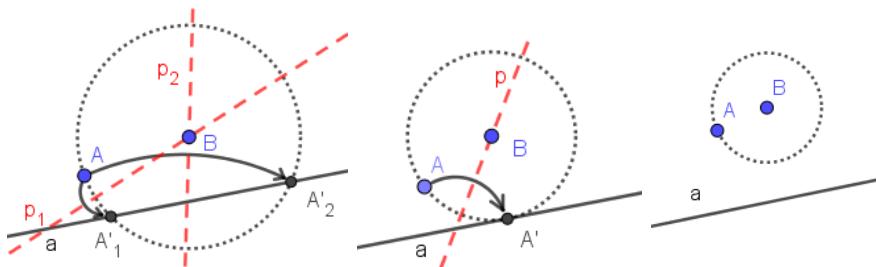
Operacija O5 nam podaja konstrukcijo pravokotnice na premico skozi dano točko (slika 4). Pri tem je vseeno, ali točka leži na premici ali ne. Pregib opravimo tako, da premico a položimo samo nase in da hkrati točka A leži na pregibu. Zaradi simetrije je pregib res pravokoten na premico in tako tudi en sam.



Slika 4: Operacija O5.

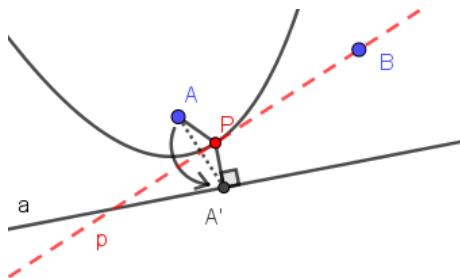
Operacija O6 je še posebej zanimiva. Pri njeni konstrukciji iščemo pregib skozi točko B , ki točka A položi na premico a . S prstom upognemo papir čez točko B in tam držimo, nato pa del papirja s točko A premikamo po drugem delu, dokler se točka A ne dotakne premice a . Takrat prepognemo po celotni dolžini pregiba.

Poglejmo konstrukcijo še iz evklidskega vidika. Ker točka B leži na pregibu, je enako oddaljena tako od točke A kot tudi njene slike A' na premici a , torej je A' ravno presečišče premice a in krožnice s središčem v B ter polmerom AB . Pregib je simetrala daljice AA' , ki po konstrukciji poteka skozi točko B . Če velja $d(A, B) > d(B, a)$, sta presečišči s premico a dve (in s tem tudi dva možna pregiba, gl. sliko 5 levo), v primeru $d(A, B) = d(B, a)$ je presečišče eno samo (in s tem en možen pregib, gl. sliko 5 na sredi) in je premica a takrat tangentna na omenjeno krožnico, v zadnjem primeru, ko velja $d(A, B) < d(B, a)$, pa presečišč ni (in s tem tudi pregiba, gl. sliko 5 desno).



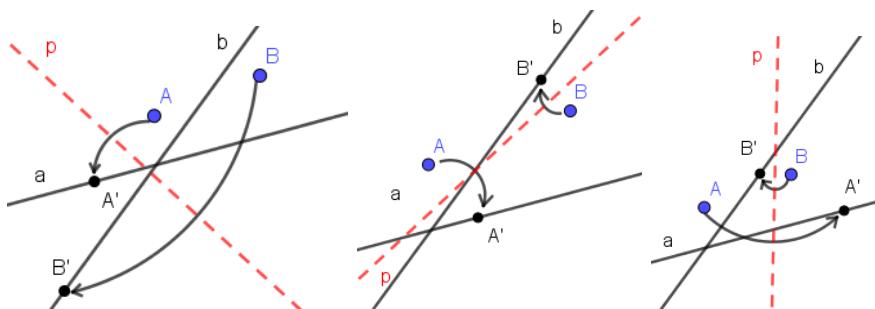
Slika 5: Operacija O6 v vseh treh primerih.

Zgodba operacije O6 se tu še ne zaključi. Ker na pregibu ležijo vse točke, ki so enako oddaljene od točke A in A' , to velja tudi za točko P , ki jo dobimo kot presečišče pregiba in pravokotnice na premico a skozi A' (slika 6). To je edina točka P na pregibu, za katero velja $d(A, P) = d(P, a)$ (v srednjem primeru na sliki 5 je to kar točka B), kar pomeni, da točka P leži na paraboli z goriščem A in premico vodnico a . Pregib torej seka parabolo le v eni točki, kar pomeni, da je to *tangenta na to parabolo*. V levem primeru na sliki 5 smo dobili dve tangenti.⁴



Slika 6: Konstrukcija tangente na parabolo z goriščem v A in premico vodnico a .

Poglejmo si naslednjo operacijo. Konstrukcijo O7 začnemo z upogibom papirja, ki točko A položi na premico a , potem pa en upognjen del papirja po drugem delu premaknemo tako, da točka A ostane na premici a (med premikanjem papirja se lahko premika po premici) in se točka B stakne s premico b . Takrat naredimo pregib. Na sliki 7 so za isto izbiro točk in premic prikazani trije pregibi, kar je tudi največje možno število pregibov za iste točke in premice. Več o številu pregibov pri tej operaciji je pojasnjenega v začetku poglavja 6.

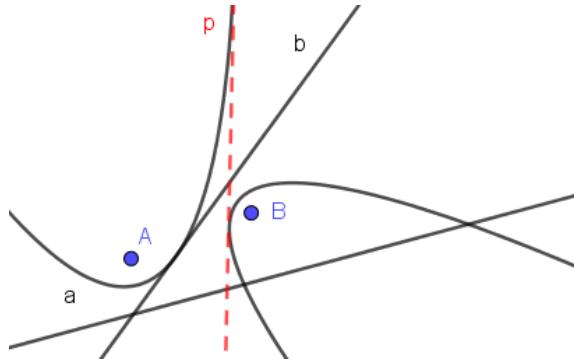


Slika 7: Operacija O7 (primer treh pregibov za isti točki in premici).

Kaj je geometrijski pomen te operacije? Če smo pri operaciji O6 dobili tangentno na parabolo, potem lahko takoj vidimo, da pri operaciji O7 dobimo *skupno tangentno na dve paraboli* – ena ima gorišče v točki A in premico vodnico a , druga pa gorišče v točki B ter premico vodnico b (slika 8).

Opomba 2.5. O pregibu iz operacije O7 naj bi prva pisala italijanski matematičarki Margherita P. Beloch, po kateri operacijo imenujemo tudi *Belochin pregib*.

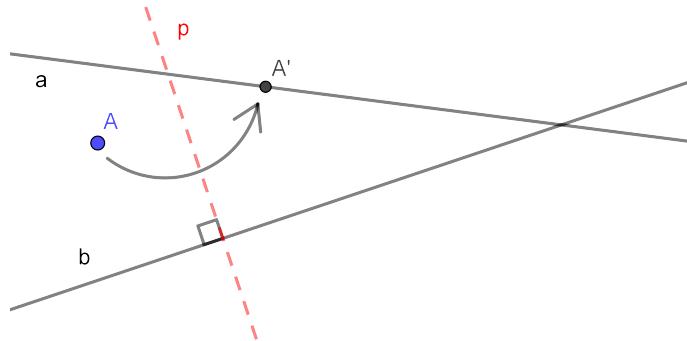
⁴Bolj znanih pod imenom *Huzita-Hatorii aksiomi*, vendar izraz *aksiom* tu ni primeren, saj bomo kmalu pokazali, da se med seboj prepletajo in so nekateri izmed njih kombinacija drugih. Prav tako v tej nalogi v ime seznama ne vključimo imen avtorjev, ker je seznam delo veliko več matematikov kot le Hatorija in Huzite.



Slika 8: Operacija O7 kot konstrukcija skupne tangente na dve paraboli.

Zadnja operacija O8 zahteva nevzporedni premici, saj v nasprotnem primeru ne moremo konstruirati pregiba, ki bi bil pravokoten na obe premici in točko A položil na premico a (razen če le-ta že leži na njej). Konstrukcijo začnemo tako, da opravimo rahel upogib, pravokoten na premico b . Upogib premikamo po tej premici (še vedno ohranjamо njegovo pravokotnost nanjo), dokler se točka A ne dotakne premice a .

Premislimo še njegovo evklidsko konstrukcijo: ker mora biti pregib pravokoten na premico b , bo slika točke A (označena z A') ležala na vzporednici skozi točko A k premici b . Prav tako mora točka A' ležati na premici a , torej je slika ravno presečišče omenjene vzporednice in premice a . Iskan pregib je simetrala daljice AA' , ki je po konstrukciji pravokoten na premico b (slika 9).



Slika 9: Operacija O8.

Opomba 2.6. Origami operacije ne podajajo konstrukcije slik točk, temveč samo pregibe, ki točke preslikajo na premice. Slike točke konstruiramo šele po uporabi operacije O5 – skozi originalno točko naredimo pregib, pravokoten na pregib iz izbrane operacije, in slika je presečišče te pravokotnice in premice, na katero smo prepognili originalno točko.

Zadostne in potrebne origami operacije

Omenili smo že, da je teh osem operacij zadostnih za katerokoli origami konstrukcijo, kar nam pove naslednji izrek. Njegov dokaz izpustimo (bralec si ga skupaj s slikovno ponazoritvijo lahko pogleda v [20, str. 24–26 (izrek 1.1)]), njegova ideja pa je, da vsak

možen prepogib, ki prekrije točko ali premico s točko ali premico (gl. seznam petih možnosti v začetku razdelka 2.2) uvrstimo v eno izmed origami operacij O1–O8.

Izrek 2.7. Če dovolimo le enkratne in ravne pregibe, so edine možne operacije prepogibanja operacije O1–O8.

Vendar ali so vse te operacije tudi potrebne – lahko katero izpustimo? Operacija O2 je očitno potrebna, saj nam edina določa nove točke. Če podrobnejše opazujemo ostale konstrukcije, pa opazimo, da so vse posebni primeri operacije O7, ko premici a in b sovpadata ali ko ena ali obe izmed točk A in B ležita na premici:

- Operacija O1: Naj točka A leži na premici a , točka B pa na premici b . Pregib skozi točki A in B točko A ohrani na premici a in točko B na premici b .
- Operacija O3: Naj točka A leži na premici b , točka B pa na premici a . Pregib, ki položi točki drugo na drugo, točko A položi na premico a in hkrati točko B na premico b .
- Operacija O4: Naj točka A leži na premici b , točka B pa na premici a . Simetrala kota v presečišču premic (ali vmesna vzporednica, če sta premici a in b vzporedni), točko A položi na premico a in hkrati točko B na premico b .
- Operacija O5: Naj točka A leži na premici a , točka B pa na premici b . Pregib skozi točko A (ali B), ki je pravokoten na premico b (ali a), točko A ohrani na premici a in točko B na premici b .
- Operacija O6: Naj točka B leži na premici b . Pregib skozi točko B , ki točko A preslika na premico a (če tak pregib obstaja), točko B ohrani na premici b .
- Operacija O8: Naj točka B leži na premici b . Pregib, ki točko A položi na premico a in je pravokoten na premico b , točko B ohrani na premici b .

Ker lahko vse konstrukcije po izreku 2.7 opišemo z operacijami O1–O8, smo s tem dokazali spodnji izrek:

Izrek 2.8. Če imamo dani vsaj dve točki in dve nevzporedni premici, ki vsebujueta dane točke, potem lahko vse origami konstrukcije z enkratnimi in ravnimi pregibi opišemo s kombinacijo operacij O2 in O7.

Opomba 2.9. V izreku lahko namesto dveh nevzporednih premic vzamemo le eno premico, ki vsebuje obe točki. Operacija O4 v tem primeru ni izvedljiva, saj za simetralo kota potrebujemo dve premici, sicer pa vsi pregibi iz operacij O1–O8 (razen O4) potekajo ali po tej premici ali pa so pravokotni nanjo v eni izmed točk.

Kljub temu bomo pri opisu origami konstrukcij uporabljali vseh osem aksiom operacij, saj bomo kakšen pregib lažje razložili preko ene od ostalih petih operacij kot pa opisovali, na kakšen način je to operacija O7.

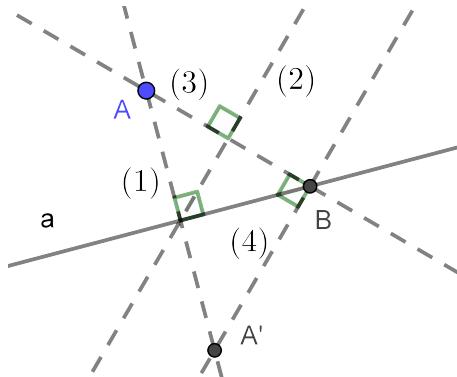
2.2.2 Zrcaljenje točke čez premico

Operacija O3 nam poda simetralo daljice AB . Torej je točka B zrcalna slika točke A čez to premico. Kaj pa, če imamo za neko točko A že dano premico a in iščemo njeni zrcalni slike?

Naravna rešitev je, da naredimo pregib po premici in s svinčnikom označimo zrcalno sliko. A ker po definiciji 2.4, ki pravi, da lahko točke dobimo le kot presečišča pregibov, in ker je uporaba pisala dovoljena le za vidnejšo označbo že konstruiranih točk, tega ne smemo storiti. Zato moramo najti zaporedje pregibov, kjer na koncu kot presečišče nekih dveh premic dobimo želeno točko.

Za dano premico a in točko A , ki ne leži na tej premici (sicer je točka A zrcalna slika sama sebi), lahko zrcalno sliko točke konstruiramo z naslednjimi koraki (prikazani na sliki 10, postopek vzet iz [20, str. 28]):

1. Z operacijo O5 prepognemo pravokotnico na premico a skozi točko A .
2. Z operacijo O4 prepognemo simetralo kota, ki ga oklepata premica a in pravokotnica iz prvega koraka.
3. Z operacijo O5 prepognemo pravokotnico na simetralo skozi točko A . Njen presečišče s premico a označimo z B .
4. Z operacijo O5 prepognemo pravokotnico na pregib iz tretjega koraka skozi točko B . Presečišče novega pregiba in pravokotnice iz prvega koraka označimo z A' .



Slika 10: Zrcaljenje točke A čez premico a s prepogibanjem papirja.

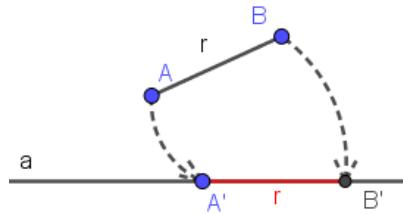
Trditev 2.10. Točka A' iz opisane konstrukcije je zrcalna slika točke A .

Dokaz. Trikotnik, ki ga dobimo po 3. koraku, je pravokoten in enakokrak, saj je simetrala (pravega kota) iz 2. koraka pravokotna na njegovo osnovnico. Zato kot ob točki A znaša 45° . Ker je trikotnik $\triangle A'BA$ pravokoten, je zato tudi enakokrak, torej premica a razpolavlja daljico AA' , torej je A' res zrcalna slika točke A . \square

Ker lahko čez premico zrcalimo točke, lahko čeznjo zrcalimo tudi daljice oz. premice – to storimo tako, da zrcalimo dve točki z daljice in naredimo pregib čez njuni slike.

Trditev 2.11. Z ravnimi in enkratnimi preopogibi ter upoštevanjem origami operacij lahko s prepogibanjem papirja prenašamo razdalje.

Dokaz. V ravnini si izberimo poljubni točki A in B , ki določata dolžino r . Naj bo a poljubna premica in A' poljubna točka na njej. Trditev pravi, da lahko z origami operacijami konstruiramo točko $B' \in a$, da je $d(A', B') = r$ (slika 11). Pri tem ni pomembno, na kateri strani točke A' leži točka B' , saj jo lahko vedno zrcalimo čezno.

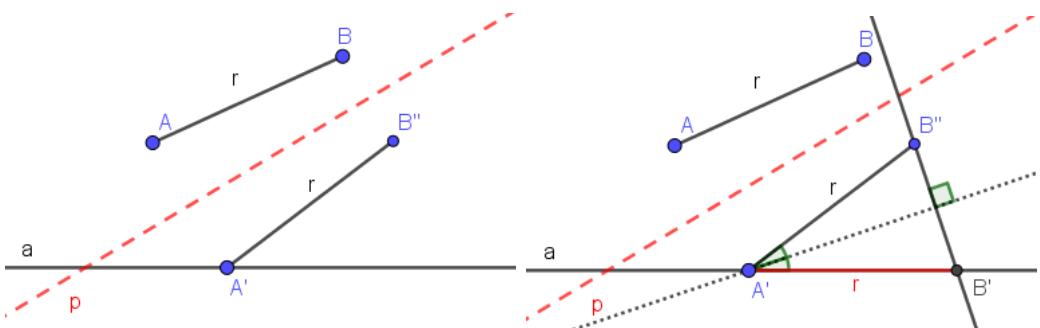


Slika 11: Prenos dolžine dolžice AB na premico a k izbrani točki A' .

Prenos razdalje razdelimo na dva koraka:

- Če $A \neq A'$, dolžico AB zrcalimo čez tisto premico p , ki točko A preslika v točko A' (po O3 je tak pregi oz. premica ena sama). Zrcalno sliko točke B označimo z B'' (slika 12 levo). V posebnem primeru, ko dolžica AB leži na premici a , je to že konec konstrukcije.
- Doljico $A'B''$ zavrtimo okoli krajišča A' , da se točka B'' preslika na premico a . To storimo tako, da z operacijo O4 konstruiramo simetralo kota med dolžico $A'B''$ in premico a in čezno zrcalimo točko B'' (slika 12 desno). S tem dobimo točko $B' \in a$, ki je po konstrukciji od točke A' oddaljena za dolžino r .

S tem smo razdaljo r prenesli na poljubno mesto v ravnini.



Slika 12: Zrcaljenje dolžice AB (levo) in rotacija dolžice čez eno krajišče (desno).

□

Tako lahko s prepogibanjem papirja zrcalimo točke (in premice), prenašamo razdalje pa tudi – po 2. koraku iz zgornjega dokaza – rotiramo točke (in premice). Od sedaj naprej pa bomo pri konstrukcijah, ki vključujejo zrcaljenje točk ali premic, zaradi preglednosti izpustili potrebne pregi in zrcaljene točke konstruirali kar z ravnalom in označili s svinčnikom.

2.3 Zakaj origami konstrukcije nadvladajo evklidske

Prišli smo do ključnega dela poglavja – reševanje vprašanja, zakaj se nam z origami konstrukcijami sploh splača ukvarjati.

Tako z evklidskim orodjem kot s prepogibanjem papirja lahko konstruiramo premice in točke ter prenašamo razdalje. Le evklidskim orodjem lahko konstruiramo tudi krožne loke, ker pa znamo rotirati točke okoli druge točke, lahko tudi s prepogibanjem papirja konstruiramo katerokoli točko na krožnici z danim središčem in polmerom. Tako lahko vse evklidske konstrukcije opravimo tudi z origamijem (za natančnejši dokaz glej [10, str. 362–365]).

Ob posameznih opisih operacij O1, O3, O4, O5, O6 in O8 smo že premislili, kako jih je mogoče opraviti tudi z evklidskim orodjem. Tudi operacija O2 je od evklidskih konstrukcij že znana. Do tu nam torej origami konstrukcije niso dale ničesar novega.

Ključna je sedma operacija. Izkaže se namreč, da operacije O7 oz. Belochinega pregiba ne moremo opraviti z evklidskim orodjem. Kako lahko to dokažemo? V poglavju 4 bomo med drugim spoznali več origami postopkov, ki nam poljuben kot razdelijo na tri skladne dele, pri tem pa uporabimo pregib iz operacije O7. Ker *trisekcija kota z evklidskim orodjem ni mogoča* (gl. konec razdelka 2.3.1), posledično tudi konstrukcija operacije O7 s tem orodjem ne obstaja. Prav tako bomo v poglavju 6 videli več načinov uporabe operacije O7 za reševanje kubične enačbe, za katero prav tako vemo, da je v splošnem z evklidskim orodjem ne moremo rešiti.

Sedaj vemo, da je množica evklidskih konstrukcij *prava* podmnožica origami konstrukcij. V naslednjem razdelku si bomo pogledali, kako lahko evklidske in origami konstrukcije prevedemo v jezik algebre in tudi na algebrski način pokažemo premoč origamija nad evklidskim orodjem. Raziskovali bomo, katere dolžine (in s tem katera števila) lahko z obema orodjem konstruiramo. Tak pogled je imel že Evklid, ki je na števila gledal kot končni rezultat niza konstrukcij z evklidskim orodjem pri dani daljici enotske dolžine [24, str. 164].

2.3.1 Algebrski pogled na evklidske konstrukcije

Definicija 2.12. Na listu papirja, ki nam služi kot model ravnine \mathbb{C} , imejmo dano izhodišče O in število 1 na realni osi. Če lahko z neoznačenim ravnalom in šestilom s končnim številom potez konstruiramo kompleksno število α , rečemo, da je α *evklidsko-konstruktibilno* število.

Kompleksna ravnina \mathbb{C} je v bijekciji z ravnino \mathbb{R}^2 . Če lahko z evklidskim orodjem konstruiramo število $\alpha = a + bi$, lahko torej konstruiramo točko (a, b) in obratno. Tako je dovolj obravnavati evklidske konstrukcije v realni ravnini.

Iz definicije 2.2 evklidskih konstrukcij se spomnimo, da lahko premoč konstruiramo le skozi poljubni dve dati točki, krožnico s središčem v poljubni dati točki in poljubno dano točko na njej, točke z evklidskim orodjem pa dobimo le kot presečišče dveh premic, dveh krožnic ali premice in krožnice.

Definicija 2.13. Točki, ki jo lahko v ravnini \mathbb{R}^2 konstruiramo z evklidskim orodjem, pravimo *evklidsko-konstruktibilna točka*. Enako definiramo *evklidsko-konstruktibilno premoč* in *evklidsko-konstruktibilno krožnico*.

Radi bi določili množico vseh evklidsko-konstruktibilnih števil. Torej iščemo, katere vse možne točke v ravnini \mathbb{R}^2 lahko konstruiramo z evklidskim orodjem. Naslednja lema nam iskanje še poenostavi.

Lema 2.14. *Naj bo $\alpha = a + bi \in \mathbb{C}$, kjer $a, b \in \mathbb{R}$. Potem je α evklidsko-konstruktibilno število, če in samo če sta a, b evklidsko-konstruktibilni števili.*

Dokaz. Ker sta a in b pravokotni projekciji števila α na realno in imaginarno os – bralec naj premisli, kako ju lahko konstruiramo z evklidskim orodjem –, je trditev očitna. \square

Iščemo, katere realne koordinate so evklidsko-konstruktibilne, torej v resnici iščemo množico *realnih* evklidsko-konstruktibilnih števil. Označimo jo z \mathbb{E} . Po definiciji 2.12 velja $0, 1 \in \mathbb{E}$, po lemi 2.14 pa $\alpha = a + bi$ je evklidsko-konstruktibilno število natanko takrat, ko velja $a, b \in \mathbb{E}$.

Trditev 2.15. *Naj bodo $a, b, c \in \mathbb{E}, c \neq 0$. Potem so tudi števila $a+b, a-b, ab, a/c$ in \sqrt{a} elementi množice \mathbb{E} .*

Dokaz tu opustimo. Bralec si ga lahko ogleda v [25], [24, str. 165–170] ali pa v dokazovanju podobnega izreka za števila, konstruktibilna z origamijem (gl. izrek 2.29 v nadaljevanju). Iz trditve sledi, da je množica \mathbb{E} , ki je podmnožica polja realnih števil, tudi sama polje.

Posledica 2.16. *Množica \mathbb{E} je podpolje polja \mathbb{R} .*

Velja še več – to, da iz $a \in \mathbb{E}$ sledi $\sqrt{a} \in \mathbb{E}$, je lastnost *evklidskih polj*. Primer evklidskega polja je množica realnih števil, medtem ko npr. množica racionalnih števil te lastnosti nima – za $2 \in \mathbb{Q}$ velja $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$.

Še vedno pa moramo določiti realna števila, ki sestavljajo množico \mathbb{E} . Očitno je, da iz danih števil 0 in 1 s seštevanjem in odštevanjem dobimo vsa cela števila, z deljenjem vsa racionalna števila, s korenjenjem pa še njihove kvadratne korene. Naslednja lema je zato očitna.

Lema 2.17. *Naj bo $a \in \mathbb{Q}$. Potem velja $a, \sqrt{a} \in \mathbb{E}$.*

Posledica 2.18. *Velja $\mathbb{Q} \subset \mathbb{E} \subset \mathbb{R}$.*

Dokaz. Očitno je množica racionalnih števil prava podmnožica množice \mathbb{E} . Ovreči moramo samo možnost $\mathbb{E} = \mathbb{R}$. Vsako število iz množice \mathbb{E} je rezultat seštevanja, odštevanja, množenja, deljenja in korenjenja elementov iz te množice (z začetnima številoma 0 in 1), zato je algebraično nad \mathbb{Q} – je rešitev neke enačbe z racionalnimi koeficienti. Torej v množici \mathbb{E} ne morejo biti transcendentna število, kot je na primer število π . Zato je \mathbb{E} res prava podmnožica množice \mathbb{R} . \square

Ker je polje \mathbb{Q} podpolje polja \mathbb{E} , je \mathbb{E} razširitev polja \mathbb{Q} . Ideja je, da poiščemo najmanjšo razširitev polja racionalnih števil, ki je zaprta za operacijo kvadratnega korenjenja. To bo naša množica \mathbb{E} . V pomoč nam je naslednja trditev.

Trditev 2.19. *Naj bo $r \in \mathbb{Q}^+, \sqrt{r} \notin \mathbb{Q}$. Potem je množica $\mathbb{Q}(\sqrt{r}) = \{a + b\sqrt{r}; a, b \in \mathbb{Q}\}$ razširitev polja \mathbb{Q} .*

Dokaz. Naj bo r poljubno racionalno število po predpostavki trditve. Očitno velja $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{r})$, saj so v $\mathbb{Q}(\sqrt{r})$ med drugim tudi vsa števila oblike $a + 0 \cdot \sqrt{r} = a$, kjer je $a \in \mathbb{Q}$ poljubno. Dokazati moramo, da je $\mathbb{Q}(\sqrt{r})$ polje.

Očitno je $0, 1 \in \mathbb{Q}(\sqrt{r})$, če vzamemo $a \in \{0, 1\}$ in $b = 0$. Bralcu prepustimo lahek računski preostanek dokaza, kjer mora pokazati, da so vsota, razlika, produkt in količnih števil $a_1 + b_1\sqrt{r}$ in $a_2 + b_2\sqrt{r}$ oblike $a_3 + b_3\sqrt{r}$. \square

Za ustrezni r lahko na enak način poiščemo razširitev polja $\mathbb{Q}(\sqrt{r})$. Vzamemo $q \in \mathbb{Q}(\sqrt{r})^+, \sqrt{q} \notin \mathbb{Q}(\sqrt{r})$. Potem so elementi nove razsiritve polja $\mathbb{Q}(\sqrt{r})$ oblike $(a_1 + b_1\sqrt{r}) + (a_2 + b_2\sqrt{r})\sqrt{q}$. Pri tem velja $a_1 + b_1\sqrt{r}, a_2 + b_2\sqrt{r} \in \mathbb{Q}(\sqrt{r})$ in $a_1, b_1, a_2, b_2 \in \mathbb{Q}$.

Primer (vzeto iz [32, str. 36]): Naj bo $F = \mathbb{Q}(\sqrt{5})$, torej so njegovi elementi oblike $a + b\sqrt{5}$, kjer sta $a, b \in \mathbb{Q}$. Za število $q = (35 - 15\sqrt{5})/2 \in F^+$ je njegov koren enak številu $\sqrt{q} = (5 - 3\sqrt{5})/2 \in F$, zato $F(\sqrt{q}) = F$ ni razširitev polja F . Za število $2 \in F^+$ pa ne obstajata $a, b \in \mathbb{Q}$, da bi veljalo $\sqrt{2} = a + b\sqrt{5}$, torej $\sqrt{2} \notin F$ in je $F(\sqrt{2})$ razširitev polja F . Pišemo $F(\sqrt{2}) = \mathbb{Q}(\sqrt{5}, \sqrt{2})$.

Definicija 2.20. Naj bo F_0 polje in $r \in F_0^+, \sqrt{r} \notin F_0$. Potem polje

$$F_0(\sqrt{r}) = \{a + b\sqrt{r}; a, b \in F_0\}$$

imenujemo *kvadratna razširitev* polja F_0 . Če je

$$F_1 = F_0(\sqrt{r_1}), F_2 = F_1(\sqrt{r_2}), \dots, F_n = F_{n-1}(\sqrt{r_n}),$$

potem pišemo $F_n = F_0(\sqrt{r_1}, \sqrt{r_2}, \dots, \sqrt{r_n})$ in vsako od polj $F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$ imenujemo *iterativna kvadratna razširitev* polja F_0 .

Velja $F_0 \subset F_1 \subset F_2 \subset \dots \subset F_n$. Za vsak $i \in \{1, \dots, n\}$ je stopnja razsiritve polja F_i nad poljem F_{i-1} enaka $[F_i : F_{i-1}] = [F_{i-1}(\sqrt{r_i}) : F_{i-1}] = 2$, saj je $x^2 - r_i$ minimalni polinom števila $\sqrt{r_i}$ nad F_{i-1} . Iz algebre se spomnimo naslednjega izreka.

Izrek 2.21. *Naj bo polje L končna razširitev polja F in naj bo polje E končna razširitev polja L . Potem je E končna razširitev F in velja*

$$[E : F] = [E : L] \cdot [L : F].$$

Posledica 2.22. *Naj bodo $F_0 \subset F_1 \subset F_2 \subset \dots \subset F_n$ kvadratne razsiritve obsega F_0 . Potem je $[F_n : F_0] = 2^n$.*

Dokaz. Po izreku 2.21 preko indukcije dobimo

$$\begin{aligned} [F_n : F_0] &= [F_n : F_{n-1}] \cdot [F_{n-1} : F_0] \\ &= 2 \cdot [F_{n-1} : F_0] \\ &= 2^2 \cdot [F_{n-2} : F_0] \\ &\vdots \\ &= 2^n. \end{aligned}$$

\square

Naj bo $F_0 = \mathbb{Q}$. Iz trditve 2.19 takoj vidimo, da velja $\mathbb{Q}(\sqrt{r}) \subset \mathbb{E}$. Bralec je povabljen k induktivnemu razmisleku, da za vsako razširitev $F_n = \mathbb{Q}(\sqrt{r_1}, \sqrt{r_2}, \dots, \sqrt{r_n})$, kjer r_i ustrezajo predpostavkam iz definicije 2.20, velja $F_n \subseteq \mathbb{E}$.

Izrek 2.23. *Množica realnih evklidsko-konstruktibilnih števil \mathbb{E} je unija vseh končnih iterativnih kvadratnih razširitev polja \mathbb{Q} .*

Da je vsako število iz neke iterativne razširitve F_n evklidsko-konstruktibilno, smo lahko razmislili tik pred navedbo tega izreka. Da velja tudi obrat, pa je potrebna obravnava vseh možnih enačb, ki jih dobimo pri iskanju presečišč dveh krožnic, dveh premic ter krožnice in premice. Bralec si lahko natančen dokaz ogleda v [32, str. 38–39] ali v [25].

Kako potem izgledajo realna evklidsko-konstruktibilna števila? To so vsa realna števila, ki jih lahko v kalkulator zapišemo z uporabo tipk

$$() 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 + - \times \div \sqrt,$$

kot je na primer število (primer iz [32, str. 37])

$$\frac{915\sqrt{1+26546\sqrt{\sqrt{67}}}-\sqrt{5+\sqrt{6-\sqrt{7}+5\sqrt{10-3\sqrt{\sqrt{6}}}}}}{\frac{614159}{100000}\sqrt{\sqrt{8-\sqrt{57-\sqrt{11}}}}}.$$

Izrek 2.24. *Naj bo $a \in \mathbb{R}$ algebraično nad \mathbb{Q} . Potem se da število a konstruirati le s pomočjo ravnila in šestila natanko tedaj, ko obstaja iterativna kvadratna razširitev F polja \mathbb{Q} , kjer je*

$$\mathbb{Q} = F_0 \subset F_1 \subset F_2 \dots \subset F_n = F$$

za nek $n \in \mathbb{N}_0$, da je $a \in F$ in stopnja razširitve polja F nad \mathbb{Q} enaka 2^n za nek $n \in \mathbb{N}_0$.

Jerman v [25, str. 77–78] tako z lahkoto dokaže, da trisekcija kota v splošnem ter konstrukcija števila $\sqrt[3]{2}$ z evklidskim orodjem nista mogoči, saj obakrat dobimo, da je stopnja razširitve polja \mathbb{Q} enaka 3:

- *Trisekcija kota 60° – iz zvezе $1/2 = \cos 60^\circ = \cos(3 \cdot 20^\circ) = 4 \cos^3 20^\circ - 3 \cos 20^\circ$, z zamenjavo $x = \cos 20^\circ$ dobimo enačbo $8x^3 - 6x - 1 = 0$, ki nima racionalne rešitve.*
- *Konstrukcija števila $\sqrt[3]{2}$ – enačba $x^3 - 2 = 0$ nima racionalne rešitve.*

Posledica 2.25. *Kompleksno število $\alpha = a + bi$ se da konstruirati z evklidskim orodjem natanko tedaj, ko velja $(a, b) \in \mathbb{E} \times \mathbb{E}$.*

Iz izreka med drugim sledi tudi, da lahko vsa realna evklidsko-konstruktibilna števila analitično zapišemo kot rešitve kvadratne enačbe z racionalnimi koeficienti. Ker med kompleksno in evklidsko ravnino obstaja bijekcija, lahko z evklidskim orodjem konstruiramo rešitve poljubne kvadratne enačbe.

2.3.2 Origami števila

Poiščimo število, ki jih lahko konstruiramo z origamijem. Definiramo jih na podoben način kot *evklidsko-konstruktibilna* števila.

Definicija 2.26. Na listu papirja, ki nam služi kot model ravnine \mathbb{C} , imejmo dano izhodišče O in število 1 na realni osi. Če lahko s končnim številom enkratnih ravnih prepogibov in upoštevanjem operacij O1–O8 konstruiramo kompleksno število α , rečemo, da je α *origami število*. Množico origami števil označimo z \mathbb{O} .

Spomnimo se, da premice v ravnini predstavljajo pregibi papirja, nove točke pa njihova presečišča. Po izreku 2.7 operacije O1–O8 zajamejo vse možne pregibe, zato so origami števila dobro definirana.

Definicija 2.27. Točki, ki jo lahko v kompleksni ravnini konstruiramo z origamijem, pravimo *origami-konstruktibilna točka*. Enako definiramo *origami-konstruktibilno premico*.

Preko sledečih izrekov in trditev bomo še na algebrski način pokazali, da je množica števil, ki jih lahko konstruiramo z evklidskim orodjem, prava podmnožica množice origami števil. Najprej navedimo lemo, ki je analogna lemi 2.14 iz razdelka o evklidsko-konstruktibilnih številih.

Lema 2.28. *Naj bo $\alpha = a + bi \in \mathbb{C}$, kjer $a, b \in \mathbb{R}$. Potem je $\alpha \in \mathbb{O}$, če in samo če $a, b \in \mathbb{O}$.*

Dokaz je enak, le da tu za konstrukcijo pravokotnih projekcij uporabimo operacijo O5, ki je bolj enostavna od evklidske.

Izrek 2.29. *Množica \mathbb{O} je podpolje polja \mathbb{C} .*

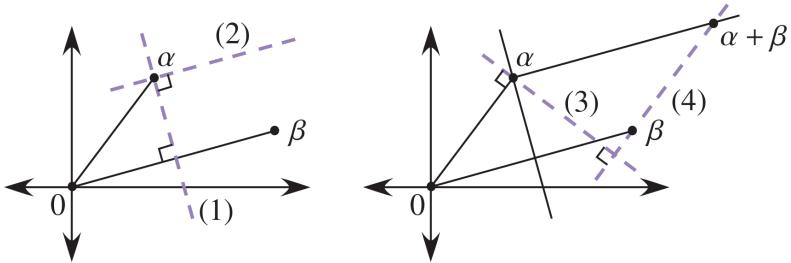
Dokaz. Za dokaz izreka moramo pokazati, da velja $0, 1 \in \mathbb{O}$ (kar velja že po definiciji), da za poljubna $\alpha, \beta \in \mathbb{O}$ velja $\alpha - \beta, \alpha\beta \in \mathbb{O}$ in da je $1/\alpha \in \mathbb{O}$ za vsak $\alpha \in \mathbb{O} \setminus \{0\}$. Spomnimo se, da lahko kompleksna števila ponazorimo z vektorji in zato lahko računske operacije grafično izvajamo kar preko njih.

Vzemimo poljubna $\alpha, \beta \in \mathbb{O}$. Ker število $-\beta$ dobimo po zaporednem zrcaljenju čez obe osi, velja $-\beta \in \mathbb{O}$. Ker je odštevanje v resnici seštevanje nasprotnega elementa, moramo za dokaz $\alpha - \beta \in \mathbb{O}$ pokazati še zaprtost množice \mathbb{O} za seštevanje.

Če števila α, β in izhodišče O ležijo na isti premici, samo prenesemo razdaljo na primerno mesto na premici (glej trditev 2.11). Predpostavimo sedaj, da α, β in O ne ležijo na isti premici in s paralelogramskim pravilom konstruirajmo število $\alpha + \beta$ (slika 13). Štirikrat uporabimo operacijo O5: preko pravokotnice (1) na vektor $\overrightarrow{O\beta}$ skozi α konstruiramo vzporednico (2) k taistemu vektorju skozi α in na enak način preko pravokotnice (3) konstruiramo vzporednico (4) k vektorju $\overrightarrow{O\alpha}$ skozi β . V presečišču vzporednic dobimo $\alpha + \beta$.

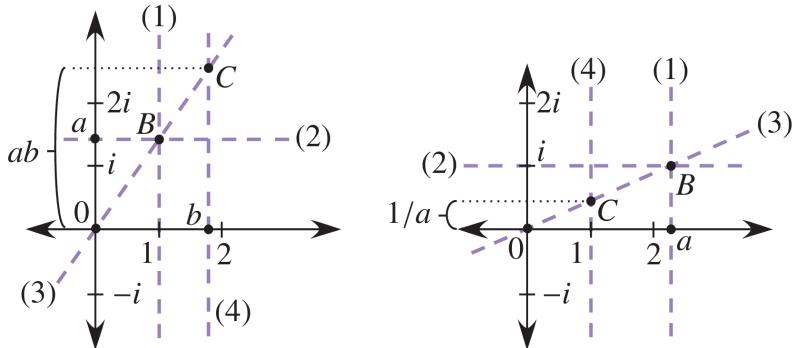
Za dokaz preostalih dveh zahtev najprej dokažimo, da za neničelna $a, b \in \mathbb{O} \cap \mathbb{R}$ velja $ab, 1/a \in \mathbb{O}$, potem pa s pomočjo leme 2.28 to dokažemo še za poljubna $\alpha, \beta \in \mathbb{O}$.

Naj bosta $a, b \in \mathbb{O} \cap \mathbb{R}$ poljubna in neničelna (če je katerikoli od njiju enak 0, je produkt ničeln in že po definiciji origami število). Ker sta a in b origami



Slika 13: Konstrukcija števila $\alpha + \beta$.

štевili, ju lahko konstruiramo. Naj b leži na realni osi, ai pa na imaginarni (slika 14 levo). Z dvakratno uporabo operacije O5 konstruiramo origami število $1 + ai$ (točka B). Konstruiramo pregib skozi O in B (premica z naklonom a) ter v presečišču s pravokotnico skozi b dobimo število $b + abi$ (točka C). Pravokotnica skozi C na imaginarno os na njej konstrira origami število ab .



Slika 14: Konstrukcija števil ab in $1/a$ za neničelna $a, b \in \mathbb{B} \cap \mathbb{R}$.

Podobno konstruiramo še število $1/a$. Na realni osi konstruiramo število a (slika 14 desno), s pomočjo O5 pa še število $a + i$ (točka B). Pregib skozi O in B ima naklon ravno $1/a$. V presečišču tega pregiba s pravokotnico na realno os v točki 1 dobimo število $1 + (1/a)i$ (točka C). Tako nam pravokotnica na imaginarno os skozi točko C konstruira origami število $1/a$.

Vzemimo sedaj poljubna $\alpha, \beta \in \mathbb{O}$. Če je $\alpha = a + bi, \beta = c + di$, potem po lemi 2.28 velja $a, b, c, d \in \mathbb{O}$. Število $\alpha\beta = (ac - bd) + (ad + bc)i$ ima v svojem realnem in imaginarnem delu vsote, razlike in produkte origami števil, ki so prav tako origami števila. Torej je $\alpha\beta \in \mathbb{O}$.

Za neničeln $\alpha = a + bi \in \mathbb{O}$ je $1/\alpha = a/(a^2 + b^2) + (-b)/(a^2 + b^2)i$. Ker sta po lemi 2.28 števili $a, b \in \mathbb{O}$, sta zopet realni in imaginarni del tega števila origami števili, torej $1/\alpha \in \mathbb{O}$. \square

Trditev 2.30. *Naj bo $\alpha \in \mathbb{O}$. Potem velja $\sqrt{\alpha}, \sqrt[3]{\alpha} \in \mathbb{O}$.*

Dokaz. Naj bo $\alpha = re^{i\theta}$ za neka $r \in (0, \infty)$ (v ničelnem primeru ni kaj dokazovati) in θ poljuben kot. Torej imamo za kvadratni in kubični koren števila α skupno pet rešitev:

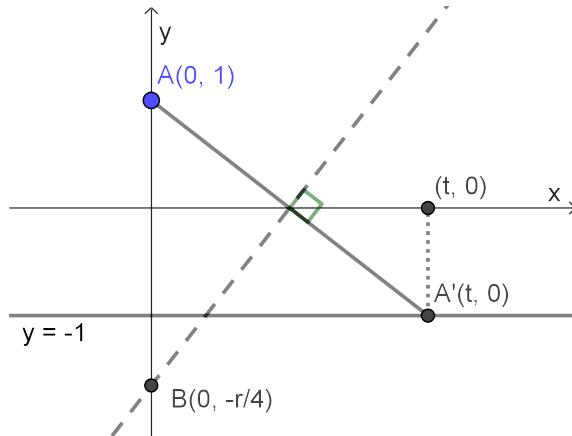
- $\sqrt{\alpha} = \pm\sqrt{r}e^{i\frac{\theta}{2}}$ in

- $\sqrt[3]{\alpha_1} = \sqrt[3]{r}e^{i\frac{\theta}{3}}, \sqrt[3]{\alpha_2} = \sqrt[3]{r}e^{i(\frac{\theta}{3} + \frac{2\pi}{3})}, \sqrt[3]{\alpha_3} = \sqrt[3]{r}e^{i(\frac{\theta}{3} + \frac{4\pi}{3})}$.

Torej moramo dokazati, da $\sqrt[3]{r}, \sqrt[3]{r} \in \mathbb{O}$, da znamo razpolavljati in tretjiniti kote ter rotirati origami število za kot 60° okoli izhodišča O . Potem bomo po izreku 2.29 lahko konstruirali zgornjih pet števil in tako dokazali to trditev.

Najprej se še prepričajmo, da $r \in \mathbb{O}$. Ker je to ravno razdalja števila α do izhodišča, jo lahko prenesemo na realno os in tako konstruiramo realno število r , torej je res $r \in \mathbb{O}$.

Za konstrukcijo števila $\sqrt[3]{r}$ vzemimo točko $A = (0, 1)$ in premico $y = -1$. Na ordinatni osi označimo točko $B = (0, -r/4)$ in z operacijo O6 skoznjo naredimo pregib, ki točko A položi na premico $y = -1$. Njena zrcalna slika je $A' = (t, -1)$ za nek $t \in \mathbb{R}$. Na koncu prepognemo še pravokotnico na abscisno os skozi točko A' in tako dobimo točko $(t, 0)$ (slika 15).



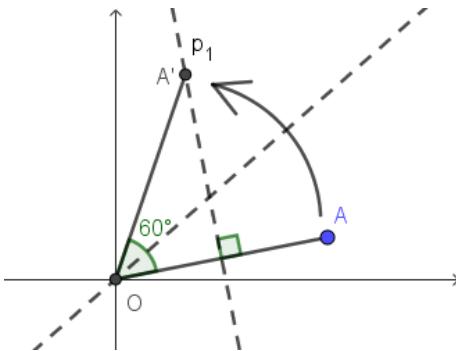
Slika 15: Konstrukcija števila $\sqrt[3]{r}$ za poljuben $r \in \mathbb{Q}^+$.

Pokažimo, da je $t = \sqrt[3]{r}$. Pregib po konstrukciji poteka skozi točko B in razpolovišče daljice AA' , torej je njegov koeficient $k_B = \frac{r}{2t}$ (izpeljavo prepuščamo bralcu). Ker je pregib simetrala daljice AA' , njena nosilka pa ima koeficient $k_A = -\frac{2}{t}$, dobimo

$$\begin{aligned} k_B &= -\frac{1}{k_A}, \\ \frac{r}{2t} &= \frac{t}{2}, \\ r &= t^2 \text{ oz. } t = \sqrt[3]{r}. \end{aligned}$$

V poglavju 6 si bomo pogledali, kako z origamijem na več načinov rešujemo poljubne kubične enačbe z racionalnimi koeficienti (npr. v razdelku 6.2 je opisan Belochin postopek preko Lillove metode), torej bomo znali konstruirati tudi rešitve enačbe $x^3 - r = 0$. Konkretne konstrukcije števila $\sqrt[3]{r}$ so opisane tudi v poglavju 4 (glej trditev 4.2).

Z operacijo O4 znamo razpoloviti kot, postopek tretjinjenja kota pa je, kot že omenjeno, opisan v razdelku 4.2. Ostane nam samo še rotacija točke za kot 60° okoli izhodišča. Na sliki 16 je prikaz enostavne konstrukcije – najprej prepognemo simetralo p_1 daljice OA in konstruiramo pregib p_2 skozi O , ki točko A preslika v točko A' na simetrali p_1 . Trikotnik $\triangle OAA'$ je enakostraničen. \square



Slika 16: Rotacija točke za kot 60° okoli izhodišča.

Množica origami števil \mathbb{O} je tako podobseg kompleksnih števil, ki vsebuje racionalna števila in je zaprt za seštevanje, odštevanje, množenje, deljenje ter za kvadratno in kubično korenjenje. Z origamijem znamo zrcaliti točke, zato je očitno zaprta tudi za konjugiranje. Z njim tako lahko poleg kvadratnih rešujemo tudi poljubne kubične enačbe (izračun rešitev po Cardanovi formuli ne potrebuje več kot ravno naštete operacije), a s tem se bomo natančneje ukvarjali v poglavju 6. Na množici \mathbb{O} torej lahko uporabimo vse tiste operacije, ki jih lahko izvajamo na množici evklidsko-konstruktibilnih števil; ker pa lahko origami števila tudi kubično korenimo, je origami števil še več (vemo že na primer, da število $\sqrt[3]{2}$ ni evklidsko-konstruktibilno, je pa origami število).

Posledica 2.31. *Množica evklidsko-konstruktibilnih števil je prava podmnožica množice origami števil.*

Kaj je naša množica origami števil? Po zgledu posledice 2.18 očitno velja $\mathbb{Q} \subset \mathbb{O} \subset \mathbb{C}$. Kot pri evklidsko-konstruktibilnih številih bomo tudi tu iskali razširitve polja racionalnih števil, ki so zaprte za operacijo kvadratnega korena, za razliko od prej pa tu dodamo še zaprtost za operacijo kubičnega korena.

Znamo konstruirati kompleksno število i . Naj bo $\mathbb{Q}(i)$ razširitev polja \mathbb{Q} , tj. $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(i)$ in velja $[\mathbb{Q}(i) : \mathbb{Q}] = 2$, saj je $x^2 + 1$ minimalni polinom števila i nad \mathbb{Q} . Polje nadalje razširimo z origami številom $\sqrt[3]{2}$. Dobimo zaporedje $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(i) \subset \mathbb{Q}(i, \sqrt[3]{2})$ in velja $[\mathbb{Q}(i, \sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}(i)] = 3$, saj je $x^3 - 2$ minimalni polinom števila $\sqrt[3]{2}$ nad $\mathbb{Q}(i)$.

Definicija 2.32. Naj bosta $E \subset F$ polji. Če velja $[F : E] \in \{2, 3\}$, polju F pravimo $2, 3$ -razširitev polja E .

Pred naslednjim izrekom poglejmo še lemo, pri čemer za kratek čas zapustimo množico kompleksnih števil in se vrnimo v realno ravnino.

Lema 2.33. *Naj bosta A in B točki s koordinatama iz polja E ter premici a in b , kjer so koeficienti iz njunih implicitnih enačb prav tako elementi polja E . Opravimo Belochin pregib, ki točko A preslika na premico a ter točko B na premico b . Premica, ki pripada pregibu, ima potem koeficiente iz razširitve polja E , ki je stopnje največ 3.*

Dokaz. Najprej obravnavajmo primer, ko točki ne ležita na nobeni izmed premic. Brez škode za splošnost vzemimo $A = (0, 1)$ in $a : y = -1$. Naj bo $B = (x_0, y_0)$ in $b : a_1x + b_1y = c_1$, kjer so $x_0, y_0, a_1, b_1, c_1 \in E$.

Analogno kot pri konstrukciji števila \sqrt{r} (glej dokaz trditve 2.30) nam tu Belochin pregib točko A preslika v točko $A' = (t, -1)$ za nek t . Enačba pregiba je tako

$$y = \frac{t}{2}x - \frac{t^2}{4}. \quad (2.1)$$

Naš cilj je dokazati obstoj razširitve F polja E , da je $t \in F$ in velja $[F : E] \leq 3$. Naj bo $B' = (x_1, y_1)$ zrcalna slika točke B preko Belochinega pregiba. Daljici AA' in BB' sta vzporedni, zato nam enačenje koeficientov njunih nosilk da zvezo

$$-\frac{2}{t} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}. \quad (2.2)$$

Upoštevamo, da središče daljice BB' s koordinatama $((x_0 + x_1)/2, (y_0 + y_1)/2)$ leži na premici z enačbo 2.1 in nato iz zvezne 2.2 izrazimo koordinati x_1 in y_1 (računsko izpeljavo prepuščamo bralcu). Dobimo parametrizacijo krivulje, ki jo opiše točka B' preko različnih pregibov, ki točko A položijo na premico a . Ko upoštevamo še, da točka B' leži na premici b , dobimo *kubično* enačbo za parameter t , ki ima vse koeficiente izražene s števili x_0, y_0, a_1, b_1 in c_1 . Zato je dovolj, da je stopnja razširitve polja E , ki vsebuje število t , največ 3.

Obravnavajmo še primer, ko ena ali obe izmed točk A in B ležita na premicah a in b . Iz izreka 2.8 vemo, da je izведен Belochin pregib v resnici ena izmed operacij ??, O3–O6 in O8. Bralcu prepuščamo daljši računski premislek po zgledu iz prvega dela dokaza, da za vsako izmed teh operacij in pri vsaki izbiri dveh točk in premic rešujemo enačbo največ druge stopnje. \square

Izrek 2.34. Število $\alpha \in \mathbb{C}$ se da konstruirati le s prepogibanjem papirja natanko tedaj, ko obstaja zaporedje 2, 3-razširitev polja \mathbb{Q} oblike

$$\mathbb{Q} = F_0 \subset F_1 \subset F_2 \dots \subset F_{n-1} \subset F_n \subset \mathbb{C}$$

za nek $n \in \mathbb{N}_0$, da je $\alpha \in F_n$.

Dokaz. Naj bo $\mathbb{Q} = F_0 \subset F_1 \subset F_2 \dots \subset F_{n-1} \subset F_n \subset \mathbb{C}$ zaporedje 2, 3-razširitev polja \mathbb{Q} . Z indukcijo dokažimo $F_n \subset \mathbb{O}$. Za $n = 0$ je to očitno ($\mathbb{Q} \subset \mathbb{O}$). Recimo, da velja $F_{n-1} \subset \mathbb{O}$. Naj bo f minimalni polinom števila $\alpha \in F_n$ nad poljem F_{n-1} , ki je stopnje največ 3, saj velja $[F_n : F_{n-1}] \in \{2, 3\}$. Število α je ničla tega polinoma, zato ga dobimo preko reševanja enačbe druge ali tretje stopnje, kar pa z origamijem znamo (glej poglavje 6). Zato je $\alpha \in \mathbb{O}$.

Naj bo sedaj $\alpha = a + bi \in \mathbb{O}$. Želimo konstruirati zaporedje 2, 3-razširitev $\mathbb{Q} = F_0 \subset \dots \subset F_n$, da bo veljalo $a, b \in F_n$. Iz tega bo sledilo $\alpha \in F_n(i)$, ki je stopnje razširitve 2 in nam dopolni iskano zaporedje razširitev polja \mathbb{Q} .

Po izreku 2.8 vemo, da lahko kakršnokoli origami konstrukcijo opravimo z operacijama O2 in O7. Z indukcijo na številu N uporabe operacije O2 na konstrukciji števila α poiščimo zaporedje 2, 3-razširitev.

Operacija O2 nam določi novo origami konstruktibilno točko oz. origami število kot presečišče dveh premic. Za $N = 0$ nismo konstruirali nove točke, torej je α že dano število in je $\mathbb{Q} = F_0 \subset \mathbb{C}$ naša 2, 3-razširitev. Recimo sedaj, da za vsako konstrukcijo origami števila preko končnega števila uporabe operacij O2 ali O7, od

česar se operacije O2 poslužimo ($N-1$)-krat, obstaja končno zaporedje 2, 3-razširitev obsega \mathbb{Q} .

Naj bo M število uporabe operacij O2 ali O7 za konstrukcijo števila α , pri čemer smo operacijo O2 uporabili N -krat. V konstrukciji števila α je to očitno zadnja izvedena operacija, saj je število α določeno kot točka v ravnini. Naj bo α presečišče origami-konstruktibilnih premic p_1 in p_2 . Obe premici sta bili lahko konstruirani le z operacijo O7, torej za vsako od njiju obstajata točki α_i in β_i , kjer je $i \in \{1, 2\}$, ter še po dve premici, da je p_i njihov ustrezan Belochin pregib. Števila $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ so bila konstruirana iz največ ($N-1$)-kratne uporabe uperacije O2, torej obstaja zaporedje 2, 3-razširitev polja \mathbb{Q} oblike $\mathbb{Q} = F_0 \subset \dots \subset F_n$, da so realni in imaginarni deli teh štirih števil vsebovani v F_n .

Polje F_n razširimo s poljem F_{n+1} , ki vsebuje koeficiente premic p_1 in p_2 . Po lemi 2.33 je potem $[F_{n+1} : F_n] \leq 3$. Presečišče Belochinih pregibov p_1 in p_2 , ki je naše število α , se izračuna iz linearne enačbe s koeficienti iz F_n , torej bo veljalo $\alpha \in F_{n+1}$. \square

Iz tega izreka sledi končna klasifikacija origami števil.

Definicija 2.35. Naj bo F razširitev polja E . Pravimo, da polinom $f(X) \in E[X]$ razпадa v F , če je $f(X)$ enak produktu linearnih polinomov iz $F[X]$. Če $f(X)$ razпадa v F in v nobenem drugem podpolju polja F , ki vsebuje E , potem polju F pravimo razpadno polje polinoma $f(X)$ nad poljem E .

Izrek 2.36. *Naj bo število $\alpha \in \mathbb{C}$ algebraično nad poljem \mathbb{Q} in naj bo L razpadno polje minimalnega polinoma števila α nad \mathbb{Q} . Potem je α origami število natanko takrat, ko velja $[L : \mathbb{Q}] = 2^a 3^b$ za neka $a, b \in \mathbb{N}_0$.*

Dokaz. Naj bo $\alpha \in \mathbb{O}$ poljubno origami število. Polje origami števil \mathbb{O} je zaprto za kvadratne in kubične korene (gl. trditev 2.30), origami operacije O1–O8 pa generirajo števila, ki so rešitve polinomov iz $\mathbb{Q}[X]$ stopnje 3 ali manj (gl. dokaz leme 2.33). Zaradi obstoja formul za rešitve kvadratnih in kubičnih enačb polje \mathbb{O} vsebuje vse rešitve polinomov iz $\mathbb{Q}[X]$ stopnje največ 3. Vsak polinom nad \mathbb{Q} stopnje največ 3 torej razпадa v polju \mathbb{O} , zato je mnnožica origami števil razpadno polje minimalnega polinoma števila α nad poljem \mathbb{Q} .

Iz tega sledi $L \subseteq \mathbb{O}$. Po izreku 2.34 obstaja zaporedje 2, 3-razširitev oblike $\mathbb{Q} = F_0 \subset F_1 \subset F_2 \dots \subset F_{n-1} \subset F_n = L \subset \mathbb{C}$. Kot v dokazu posledice 2.22 lahko tudi tu dokažemo, da potem velja $[L : \mathbb{Q}] = 2^a 3^b$ za neka $a, b \in \mathbb{N}_0$.

Za dokaz obrata je potrebno nekaj znanja Galoisove teorije. Za Galoisovo grupo $\text{Gal}(L/\mathbb{Q})$ velja $|\text{Gal}(L/\mathbb{Q})| = [L : \mathbb{Q}] = 2^m 3^n$, kar pomeni, da je taka grupa rešljiva (glej [4]). Iz tega se lahko zgradi zaporedje 2, 3-razširitev polja \mathbb{Q} za število α , ki je po izreku 2.34 zato origami število. \square

Origami števila so torej vsa števila, ki jih lahko iz danih kompleksnih števil 0 in 1 dobimo s končnim številom uporabe uperacij seštevanja, odštevanja, množenja, deljenja, konjugiranja, kvadratnega ter kubičnega korenjenja. Z njimi lahko posledično rešujemo kvadratne in kubične enačbe. Kako pa je s konstrukcijo kakšnih posebnih geometrijskih oblik, kot so pravilni večkotniki?

2.3.3 Origami-konstruktibilnost pravilnih n -kotnikov

Iz evklidske geometrije vemo, za katere n lahko z evklidskim orodjem konstruiramo pravilni n -kotnik. Spodnjega izreka tako ne bomo dokazali, ga pa bomo razširili na origami konstrukcije.

Definicija 2.37. Praštevilo p se imenuje *Fermatovo praštevilo*, če je oblike $p = 2^{2^m} + 1$ kjer je $m \in \mathbb{N}_0$.

Prvih nekaj Fermatovih praštevil⁵ je (zaporedje A000215 v OEIS – *On-Line Encyclopedia of Integer Sequences*):

$$3, 5, 17, 257, 65537, 4294967297, 18446744073709551617, \dots$$

Izrek 2.38 (Gauss-Wantzelov izrek). *Pravilni n -kotnik se lahko konstruira z neoznačenim ravnalom in šestilom natanko takrat, ko je $n = 2^a p_1 \cdots p_k$ za neka $a, k \in \mathbb{N}_0$, kjer so p_1, \dots, p_k različna Fermatova praštevila.*

Za $n \leq 20$ pravilni n -kotnik ni evklidsko-konstruktibilni v primeru

$$n \in \{7, 9, 11, 13, 14, 18, 19\}.$$

Za origami-konstruktibilnost pravilnega večkotnika se namesto Fermatovih praštevil poslužimo pomnožice praštevil, ki sta jo definirala Cox in Shurman v [5].

Definicija 2.39. Praštevilo p se imenuje *Pierpontovo⁶ praštevilo*, če je $p > 3$ in $p = 2^m 3^n + 1$ za neka $m, n \in \mathbb{N}_0$.

Izrek 2.40. *Pravilni n -kotnik se lahko konstruira z origamijem natanko takrat, ko je $n = 2^a 3^b p_1 \cdots p_k$ za neke $a, b, k \in \mathbb{N}_0$, kjer so p_1, \dots, p_k različna Pierpontova praštevila.*

Dokaz. Naj bo $\zeta_n = e^{2\pi i/n}$ n -ti koren enote. Pravilni n -kotnik lahko konstruiramo, če in samo če lahko konstruiramo kot $2\pi/n$, kar je ekvivalentno obstoju konstrukcije števila ζ_n . To število je ničla polinoma $z^n - 1 \in \mathbb{Q}[z]$, katerega razpadno polje je $\mathbb{Q}(\zeta)$. Po izreku 2.36 je $\zeta_n \in \mathbb{O}$ natanko takrat, ko je $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = 2^a 3^b$ za neka $a, b \in \mathbb{N}_0$.

Minimalni polinoma števila ζ_n nad \mathbb{Q} je oblike

$$\Phi_n(z) = \prod_{\substack{0 \leq i < n, \\ \gcd(i, n) = 1}} (z - \zeta_n^i).$$

To je dokazano v več matematičnih besedilih, ki govorijo o Galoisovi teoriji, npr. v [5, poglavje 9.1]. Sledi $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \deg(\Phi_n(z)) = \phi(n)$, kjer je ϕ Eulerjeva funkcija, ki pove, koliko naravnih števil, manjših od n , je tujih številu n . Ena od številnih formul za izračun Eulerjeve funkcije je $\phi(n) = n \prod_{p|n} (1 - 1/p)$ za $n \in \mathbb{N}$.

⁵Fermat je domneval, da je vsako število oblike $2^{2^s} + 1$ praštevilo. To pa ni res. Že Euler je ugotovil, da je število $2^{2^5} + 1$ sestavljen. Deljivo je s številom 641.

⁶Ameriški matematik James Pierpont (1866–1938) je ta praštevila uvedel l. 1895, ko je opisoval, katere pravilne večkotnike lahko konstruiramo preko stožnic.

Naj bo sedaj $n = 2^a 3^b p_1 \cdots p_k$ za neke $m, n, k \in \mathbb{N}_0$, kjer so p_1, \dots, p_k različna Pierpontova praštevila. Potem je

$$[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \phi(n)$$

$$= n \prod_{p|n} \left(1 - \frac{1}{p}\right) = \begin{cases} 2^a 3^{b-1} (p_1 - 1) \cdots (p_k - 1), & a, b > 0, \\ 2^{a-1} (p_1 - 1) \cdots (p_k - 1), & a > 0, b = 0, \\ 2 \cdot 3^{b-1} (p_1 - 1) \cdots (p_k - 1), & a = 0, b > 0, \\ (p_1 - 1) \cdots (p_k - 1), & a = b = 0. \end{cases}$$

Torej je $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = 2^s 3^t$ za neka $s, t \in \mathbb{N}_0$, torej je $\zeta_n \in \mathbb{O}$.

Za dokaz obrata predpostavimo $\zeta_n \in \mathbb{O}$, torej je $[\mathbb{Q}(\zeta_n) : \mathbb{Q}] = \phi(n) = 2^s 3^t$ za neka $s, t \in \mathbb{N}_0$. Faktorizirajmo število n v produkt potenc praštevil kot $n = q_1^{a_1} \cdots q_r^{a_r}$. Potem je

$$\phi(n) = n \prod_{p|n} \left(1 - \frac{1}{p}\right) = q_1^{a_1-1} (q_1 - 1) \cdots q_r^{a_r-1} (q_r - 1).$$

Če je kak q_i sod, je lahko le $q_i = 2$. Če je kateri izmed q_i lih, pa je lahko le $q_i = 3$ ali $a_i = 1$. Poleg tega mora biti vsak faktor $(q_i - 1)$ produkt potence števila 2 s potenco števila 3, torej je vsak q_i , večji od 3, Piermontovo praštevilo. Tako je vsak prafaktor števila n lahko število 2, 3 ali Piermontovo praštevilo, s čimer je dokaz zaključen. \square

Z origamijem sedaj lahko konsturiramo še 7-, 9-, 13-, 14-, 18- in 19-kotnik. Edini n -kotnik za $n \leq 20$, ki ni konstruktibilen tako z evklidskim orodjem kot z origamijem, je 11-kotnik.

Konstrukcija pravilnega sedemkotnika

Najmanjši pravilni večkotnik, ki ga ne moremo konstruirati z evklidskim orodjem, lahko pa ga z origamijem, je torej sedemkotnik. Italijanski matematik Benedetto Scimemi je preko analize sedemkotnika v kompleksni ravnini našel metodo za njegovo konstrukcijo, avstrijski matematik Robert Geretschläger pa tudi konkretno konstrukcijo. Njune ugotovitve v [17] lepo povzame Thomas Hull, ki velja za strokovnjaka na področju origamike, in si jih bomo pogledali v nadaljevanju.

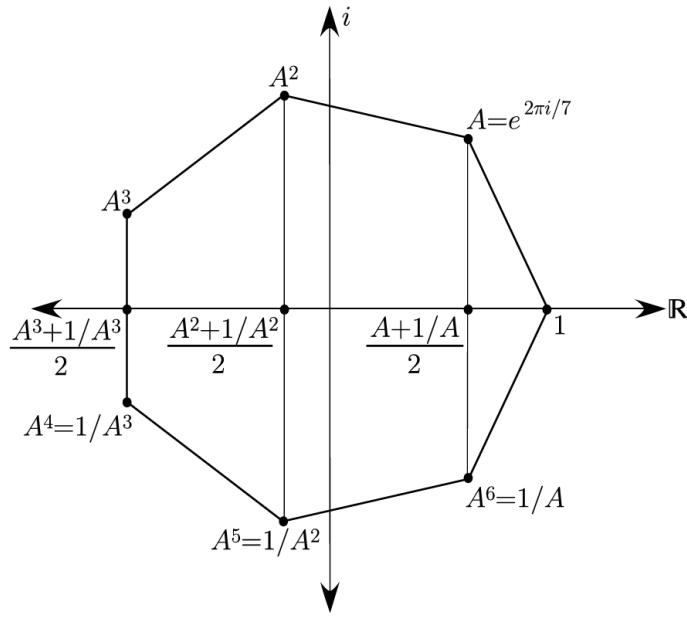
Scimemijeva ideja je bila, da si oglišča pravilnega sedemkotnika predstavljamemo kot točke na enotski krožnici v kompleksni ravnini, ki ustrezajo sedmemu korenju enote (slika 17), tj. tista kompleksna števila z , ki rešijo enačbo

$$z^7 - 1 = 0. \quad (2.3)$$

Ena od rešitev je $z = 1$, torej eno oglišče leži na realni osi. Preostale rešitve so še

$$A = e^{\frac{2\pi i}{7}}, A^2 = e^{2\frac{2\pi i}{7}}, A^3 = e^{3\frac{2\pi i}{7}}, A^4 = e^{4\frac{2\pi i}{7}}, A^5 = e^{5\frac{2\pi i}{7}} \text{ in } A^6 = e^{6\frac{2\pi i}{7}}.$$

Naš cilj je poiskati metodo, s katero lahko preko prepogibanja papirja konstruiramo kot $2\pi/7$, saj znamo rotirati točke za poljuben origami-konstruktibilen kot (točko zrcalimo čez simetralo tega kota).



Slika 17: Pravilni sedemkotnik v kompleksni ravnini. Vzeto iz [17, str. 182].

Sledenča izpeljava je sestavljenja iz več korakov. Najprej iz enačbe 2.3 faktoriziramo rešitev $z = 1$ in dobimo enačbo

$$\frac{z^7 - 1}{z - 1} = z^6 + z^5 + z^4 + z^3 + z^2 + z + 1 = 0. \quad (2.4)$$

Zaradi simetričnosti sedemkotnika čez realno os lahko to enačbo šeste stopnje preuredimo v enostavnejšo. Ker je $A = e^{2\pi i/7} = \cos(2\pi/7) + i \sin(2\pi/7)$, velja

$$\frac{1}{A} = \frac{\bar{A}}{A\bar{A}} = \frac{\bar{A}}{\cos^2(2\pi/7) + \sin^2(2\pi/7)} = \bar{A} = A^6.$$

Ker je $A + 1/A = A + \bar{A} = 2 \cos(2\pi/7)$, je središče daljice AA^6 ravno točka $(A + 1/A)/2 = \cos(2\pi/7)$ (glej sliko 17).

Iz zveze $1/A = A^6$ sledi še $1/A^2 = A^{12} = A^5$ in $1/A^3 = A^{18} = A^4$. Naj bo $z = A$ in vstavimo ravno izpeljano v enačbo 2.4. Dobimo

$$\frac{1}{A} + \frac{1}{A^2} + \frac{1}{A^3} + A^3 + A^2 + A + 1 = 0. \quad (2.5)$$

Razširimo izraza $(A + 1/A)^2$ in $(A + 1/A)^3$ v

$$A^2 + \frac{1}{A^2} = (A + \frac{1}{A})^2 - 2 \quad \text{in} \quad A^3 + \frac{1}{A^3} = (A + \frac{1}{A})^3 - 3(A + \frac{1}{A}),$$

vstavimo to v enačbo 2.5 in dobimo

$$(A + \frac{1}{A})^3 + (A + \frac{1}{A})^2 - 2(A + \frac{1}{A}) - 1 = 0.$$

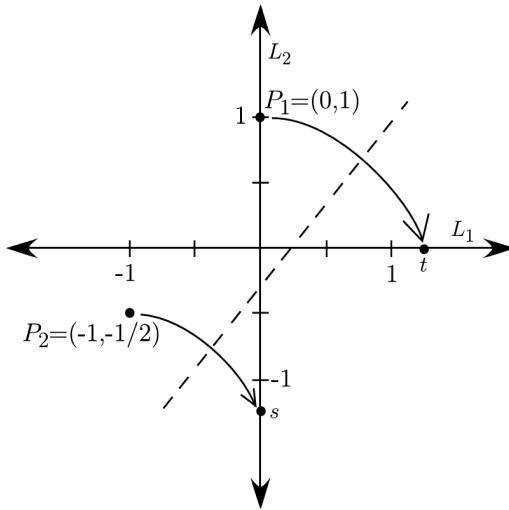
Torej je $A + 1/A = 2 \cos(2\pi/7)$ rešitev enačbe

$$z^3 + z^2 - 2z - 1 = 0. \quad (2.6)$$

Podobno bi lahko izpeljali še preostali dve rešitvi te enačbe – to sta $A^2 + 1/A^2 = 2\cos(4\pi/7)$ in $A^3 + 1/A^3 = 2\cos(6\pi/7)$, ki sta negativni.

Sedaj iščemo postopek, ki nam konstruira število $2\cos(2\pi/7)$ na realni osi. Iz tega bomo konstruirali pravokotni trikotnik, katerega kot ob izhodišču bo ravno $2\pi/7$. Nato bomo le še sedemkrat rotirali izbrano točko na realni osi za ta kot okoli izhodišča in s tem konstruirali pravilni sedemkotnik.

Za konstrukcijo števila $2\cos(2\pi/7)$ se bomo poslužili Belochinega pregiba. Vzemo realno ravnino, na njej pa točki $P_1 = (0, 1)$ in $P_2 = (-1, -1/2)$ ter premici $L_1 : y = 0$ in $L_2 : x = 0$. S pregibom položimo točko P_1 na abscisno os in hkrati točko P_2 na ordinatno os. Njuni sliki zaporedoma označimo s točkama $P'_1 = (t, 0)$ in $P'_2 = (0, s)$ za neka $s, t \in \mathbb{R}$, kjer je t očitno pozitiven (slika 18).



Slika 18: Pregib za konstrukcijo števila $t = 2\cos(2\pi/7)$. Vzeto iz [17, str. 184].

Izrazimo enačbo pregiba s spremenljivkama s in t . Pregib je pravokoten na daljici $P_1P'_1$ in $P_2P'_2$, iz česar dobimo koeficient premice, na koncu pa njeni enačbi (lahka izpeljava je prepuščena bralcu):

$$y = tx - \frac{t^2}{2} + \frac{1}{2} \quad \text{in} \quad y = -\frac{2}{2s+1}x - \frac{1}{2s+1} + \frac{2s-1}{4}.$$

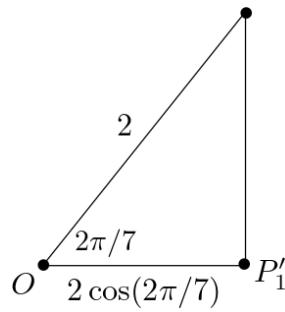
Ker gre za dve enačbi za isto premico, z enačenjem njunih koeficientov in začetnih vrednosti dobimo sistem dveh enačb za s in t :

$$t = -\frac{2}{2s+1} \quad \text{in} \quad -\frac{t^2}{2} + \frac{1}{2} = -\frac{1}{2s+1} + \frac{2s-1}{4}.$$

Iz prve enačbe izrazimo spremenljivko s , jo vstavimo v drugo enačbo in dobimo

$$-\frac{t^2}{2} + \frac{1}{2} = \frac{t}{2} + \frac{-\frac{2}{t}-2}{4} \Rightarrow t^3 + t^2 - 2t - 1 = 0.$$

Dobimo ravno enačbo 2.6. Vrednost t je torej njena edina pozitivna rešitev, tj. $t = 2\cos(2\pi/7)$. Iz tega samo še konstruiramo pravokotni trikotnik, ki ima oglišči ene katete v P'_1 in koordinatnem izhodišču, druga kateta je pravokotna na x -os v

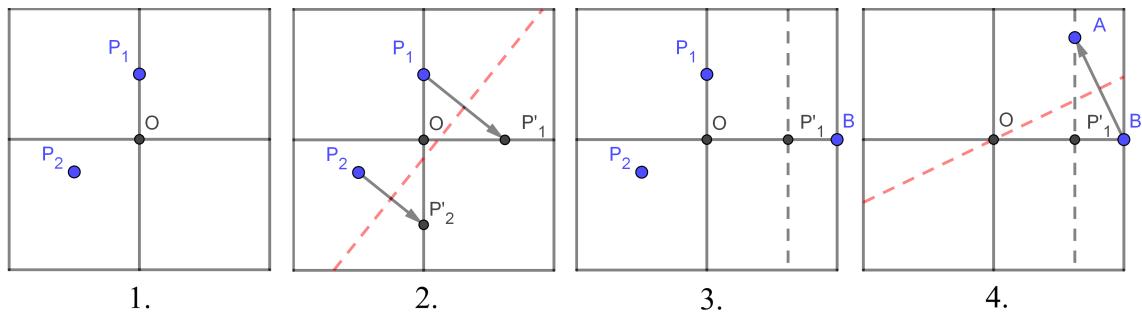


Slika 19: Konstrukcija kota $2\pi/7$ preko pravokotnega trikotnika.

točki P'_1 in hipotenuza ima dolžino 2. S tem bo kot ob koordinatnem izhodišču ravno $2\pi/7$ (slika 19).

Preostane nam le še navedba konkretne konstrukcije pravilnega sedemkotnika. V ta namen vzemimo v roke kvadraten list papirja, ki predstavlja realno ravnino, in opravimo sledeče korake (gl. sliki 20 in 21):

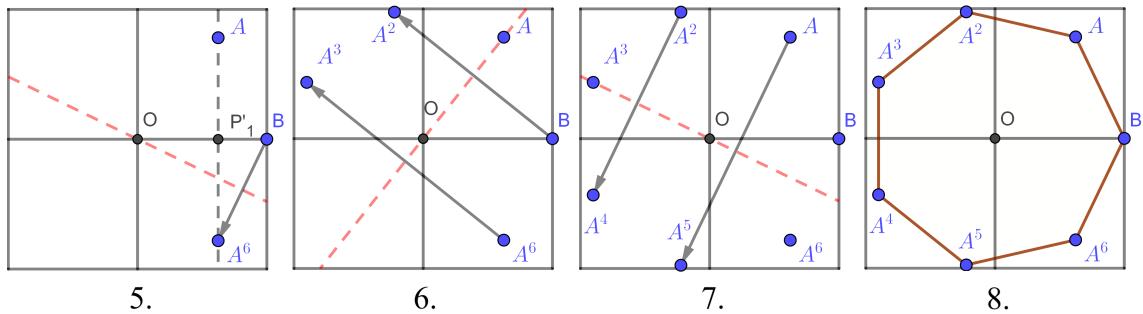
1. Predpostavimo, da je stranica kvadrata dolga 4 enote in je koordinatno izhodišče O v središču kvadrata. Papir dvakrat prepognemo na pol po dolžini, da dobimo obe koordinatni osi, konstruiramo pa še točki $P_1 = (0, 1)$ in $P_2 = (-1, -1/2)$.
2. Opravimo Belochin pregib, ki točko P_1 položi na x -os in hkrati točko P_2 na y -os. Sliko točke P_1 označimo s P'_1 .
3. Konstruiramo pravokotnico na x -os skozi točko P'_1 . Označimo prvo oglišče našega sedemkotnika s točko $B = (2, 0)$.
4. Opravimo prepogib skozi koordinatno izhodišče, ki točko B položi na pravokotnico iz prejšnjega koraka. Sliko točke B označimo z A in predstavlja drugo oglišče sedemkotnika (ker je $|OP'_1| = 2 \cos(2\pi/7)$ in $|OA| = 2$).



Slika 20: Konstrukcija oglišča A pravilnega sedemkotnika (koraki 1–4).

5. Korak 4 opravimo še na spodnjo stran x -osi in dobimo točko A^6 .
6. Naredimo pregib skozi izhodišče O in točko A . Točki B in A^6 se čezenj prezrcalita v točki A^2 in A^3 .

7. Korak ponovimo še za pregib skozi izhodišče O in točko A^3 . Sliko točk A^2 in A označimo s A^4 in A^5 .
8. Po konstrukciji točke B , A , A^2 , A^3 , A^4 , A^5 in A^6 tvorijo oglišča pravilnega sedemkotnika.



Slika 21: Konstrukcija preostalih oglišč pravilnega sedemkotnika (koraki 5–8).

3 Preogibanje lista različnih geometrijskih oblik

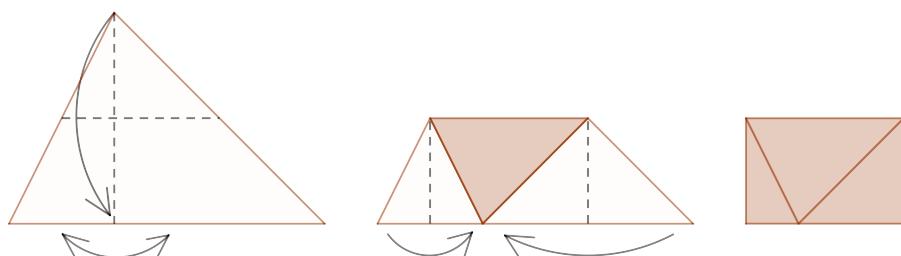
V tem poglavju bomo raziskovali, kaj lahko dobimo s preogibanjem listov papirja, ki so trikotne, pravokotne ali kvadratne oblike. Za uvod si bomo pogledali nekaj najosnovnejših konstrukcij, ki jih lahko učitelj matematike uporabi tudi pri pouku v osnovni šoli, konstruirali pa bomo tudi enakostranični trikotnik, šestkotnik in osemkotnik. Pogledali si bomo vse tri Hagove izreke o razmerjih, na katere specifični pregibi kvadratnega lista papirja razdelijo njegove stranice, nato pa to posplošili na iskanje metod za razdelitev doljice na poljubno število skladnih delov. Na kratko bomo spoznali tudi t. i. X -pregibe. Nekaj od naštetega bomo uporabili v naslednjem poglavju, kjer bomo po konstrukciji kvadratnega korena poljubnega origami števila preko več različnih postopkov končno rešili dva starogrška problema, zaradi katerih smo se sploh začeli ukvarjati s temo origamija.

3.1 Nekaj kratkih in zanimivih konstrukcij za uvod

Ponazoritev lastnosti geometrijskih likov z origamijem

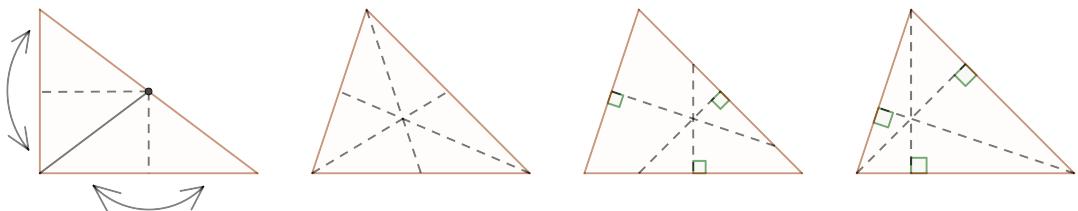
Johnson v [26] opisuje, kako lahko s preogibanjem lista papirja v obliki trikotnika, štirikotnika in kroga pokažemo določene lastnosti geometrijskih likov. Opisov, ki jih spremljajo nazorne skice konstrukcij, ne dokazuje, ampak rešitev nastavi z vprašanjimi, na katera mora bralec sam pri sebi odgovoriti. Učitelji so povabljeni, da se pri pouku večkrat poslužujejo teh pripomočkov, saj bo to za učence zanimivo, hkrati pa zelo poučno. Pri tem naj se sami odločijo, na kakšen način bodo uporabili preogibanje papirja – ali kot že podana navodila iz knjige, iz katerih morajo učenci sami ugotoviti rezultat, ali pa kot iskanje konstrukcije, ki dokaže želeno lastnost. Sedaj bomo našteli bistvene konstrukcije, ki jih navaja avtor, večinoma pa bo lažji premislek, zakaj delujejo, prepuščen bralcu.

Avtor začne z osnovami – ki jih že poznamo – kot so pregibi skozi točko, pravokotnica na premico (skozi dano točko, ki leži na njej ali ne), simetrala doljice, simetrala kota in vzporednica premic. Z zložitvijo trikotnika v pravokotnik na način, kot kaže slika 22, pokaže, da je vsota notranjih kotov trikotnika res 180° . Iz te konstrukcije tudi sledi formula za ploščino trikotnika, saj je le-ta dvakrat večja od ploščine nastalega pravokotnika, ki ima za stranici polovico osnovnice trikotnika in polovico njegove višine. Prav tako lahko tu vidimo, da je srednjica trikotnika (pregib vrha trikotnika na sliki 22 levo) simetrala njegove višine in pol krajša od njegove osnovnice.



Slika 22: Pregib trikotnika, ki njegove notranje kote zloži skupaj v iztegnjeni kot.

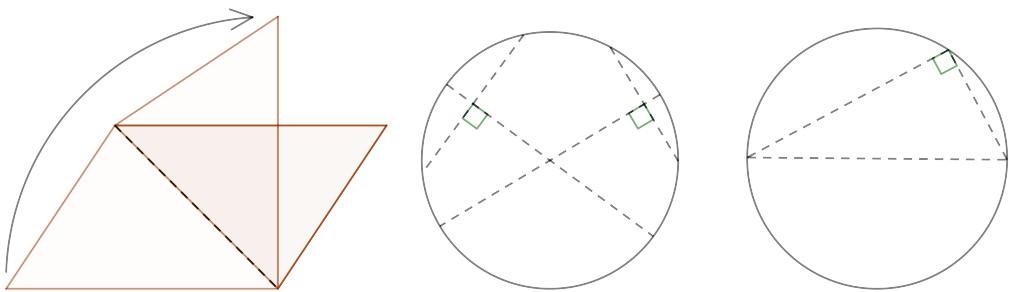
Nadalje z določitvijo središča hipotenuze pravokotnega trikotnika bralca povabi, da se s prepogibi prepriča, da nastala točka osnovni trikotnik razdeli na dva enakokraka trikotnika (slika 23 levo). Prav tako se lahko s pregibi prepriča, da se višine trikotnika, njegove težišnice, simetrale stranic ter simetrale kotov sekajo v isti točki (seveda vsaka skupina daljic zase; na sliki 23 so prikazani vsi primeri razen za simetralo kotov).



Slika 23: Prikaz še nekaj lastnosti trikotnika.

Če odložimo trikotnik in v roke vzamemo paralelogram, preko prepogiba po njegovi diagonali vidimo, da diagonale v splošnem ne razpolavljajo notranjih kotov (slika 24 levo). Slednje velja le za romb, za katerega lahko poleg tega takoj pokažemo še, da sta diagonali pravokotni druga na drugo.

Nato se avtor posveti krogu. Vsak prepogib, ki prekrije njegove robove, ga očitno razdeli na pol in je njegov premer. Dva taka, a različna prepogiba določata središče kroga. Dobi se ga tudi tako, da prepognemo dve različni tetivi in skozi vsako izmed njiju še njeno simetralo, ki se sekata v središčni točki (slika 24 na sredi). Avtor pri opisovanju konstrukcije ne uporablja izrazov, kot so "simetrala, tetiva" ipd., temveč bralec šele po opravljenih prepogibih vidi, da gre za običajne evklidske konstrukcije. Razdelek se konča še s ponazoritvijo Talesovega izreka (slika 24 desno) in konstrukcijo tangente na krožnico preko pravokotnice na premer.

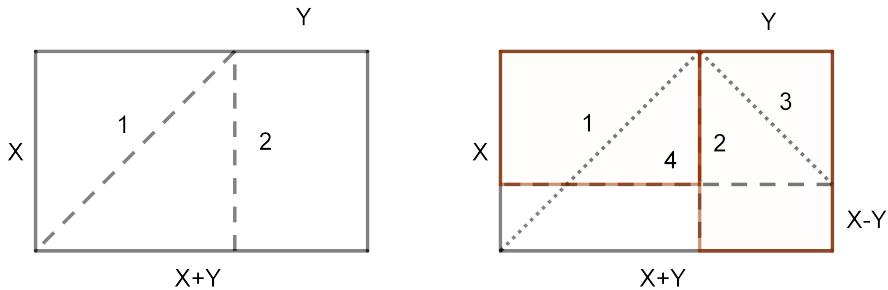


Slika 24: Prikaz nekaj lastnosti paralelograma in kroga.

Nadalje lahko s prepogibanjem pravokotnika s stranicama X in $X + Y$, kjer krajo stranico prepognemo na daljšo, ponazorimo odštevanje (slika 25 levo). Če nato prepognemo še drugi vogal, dobimo štiri manjše pravokotnike, iz česar lahko bralec sam dokaže formulo $x^2 - y^2 = (x - y)(x + y)$ (slika 25 desno).

Konstrukcija enakostraničnega trikotnika, šestkotnika in osemkotnika

Trije nevzporedni pregibi, ki se ne sekajo v isti točki, nam na papirju konstruirajo trikotnik. S štirimi pravokotnimi prepogibi dobimo pravokotnik, če njegovo krajo



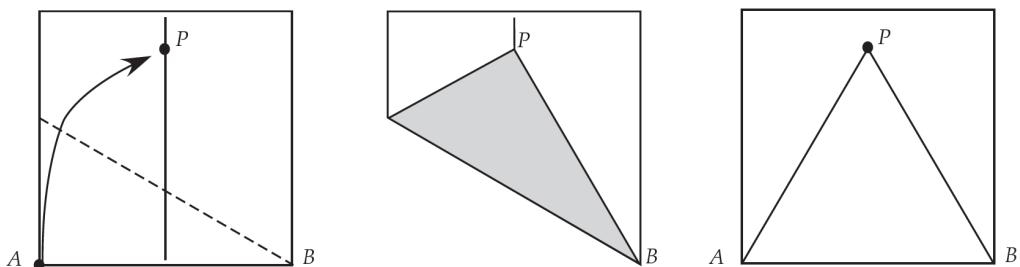
Slika 25: Prikaz odštevanja in dokaz formule $x^2 - y^2 = (x - y)(x + y)$ z označenim vrstnim redom prepogibov.

stranico prepognemo na daljšo, pa še kvadrat (kar smo že storili pri konstrukciji v prejšnjem odstavku). Če njegova oglišča prepognemo v presečišče diagonal, dobimo nov kvadrat s polovično ploščino originalnega.

Konstrukcije poljubnega trikotnika, pravokotnika in kvadrata so zelo enostavne. Malo več premisleka pa je potrebnega za konstrukcije pravilnih n -kotnikov. Iz razdelka 2.3.3 vemo, da je edini pravilni n -kotnik, kjer je $n \leq 20$ in se ga ne da konstruirati z origamijem, 11-kotnik. Postopkov za konstrukcije ostalih večkotnikov je več. Johnson se na primer v nadaljevanju iste knjige posveti konstrukciji preko večkratnega zvijanja traku, kar pa krši pravilo o enkratnih prepogibih papirja.

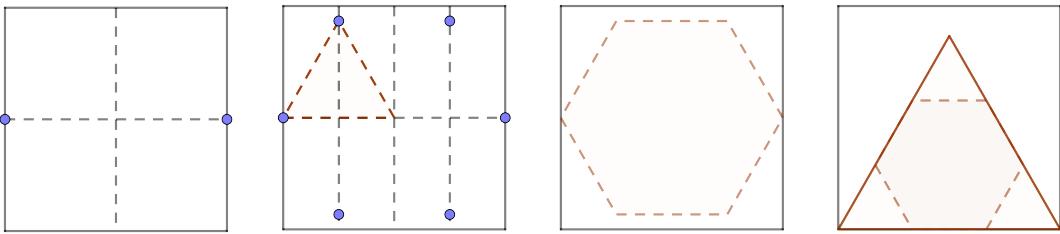
Pogledali si bomo še origami konstrukcije enakostraničnega trikotnika, šestkotnika in osemkotnika, ki jih navajata Johnson v istem viru [26, str. 14–15] in Hull v [21, str. 1–12]. Iz razdelka 2.3.3 že vemo, da se jih da konstruirati z evklidskim orodjem, zato bomo v bistvu konstrukcije z ravnilom in šestilom prevedli v konstrukcije s prepogibanjem papirja in ne bomo odkrili ničesar novega.

Vzemimo kvadratni list papirja, ga po višini prepognimo na pol in na pregib položimo spodnje desno oglišče A kvadrata, da nov pregib poteka skozi spodnje levo oglišče B (slika 26). Sliko oglišča A označimo s točko P . Ker je po konstrukciji $|AB| = |PB|$ in je vertikalnen pregib simetrala spodnje stranice kvadrata, je trikotnik $\triangle ABP$ enakostraničen.



Slika 26: Konstrukcija enakostraničnega trikotnika. Predelano iz [21, str. 9].

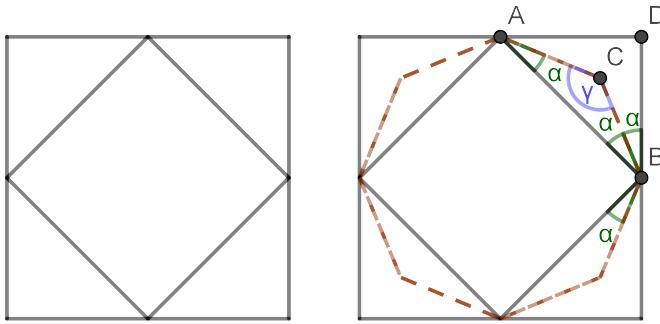
Sedaj, ko znamo konstruirati enakostranične trikotnike, lahko konstruiramo tudi pravilni šestkotnik – kvadrat s simetralama stranic razdelimo na štiri dele, nato pa v vsakem od štirih manjših kvadratov po zgornjem postopku konstruiramo enakostranični trikotnik (oz. le eno njegovo stranico) z osnovnico na horizontalni simetrali (prve tri figure na sliki 27).



Slika 27: Konstrukcija pravilnega šestkotnika na dva načina.

Še lažje pravilni šestkotnik konstruiramo preko enakostraničnega trikotnika, ki mu vrhove prepognemo v središče (slika 27 desno). Ker središče deli višine v razmerju $2 : 1$, pregibi stranice razdelijo na tri skladne dele, sam trikotnik pa na tri manjše enakostranične trikotnike in šestkotnik na sredi.

V roke vzemimo nov kvadraten list papirja in konstruirajmo najprej središča njegovih stranic. S pregibi skozi sosednji središči dobimo manjši kvadrat (slika 28 levo). Sedaj razpolovimo še vsak kot, ki ima vrh v središču stranice večjega kvadrata in za kraka po eno stranico vsakega kvadrata. Presečišča simetral dveh sosednjih krovov nam dajo še preostala štiri oglišča pravilnega osemkotnika (slika 28 desno).

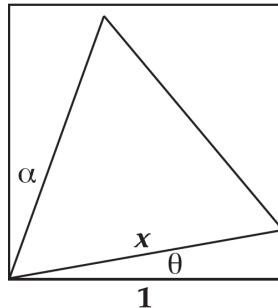


Slika 28: Konstrukcija pravilnega osemkotnika.

Ob oznakah na sliki 28 (desno) premislimo, da je to res pravilni osemkotnik: zaradi simetrije so vse stranice skladne, zato moramo dokazati le še skladnost vseh notranjih krovov. Zaradi simetrije je dovolj izračunati notranja kota osemkotnika pri ogliščih B in C , ki morata po formuli za notranji kot pravilnega n -kotnika oba biti velika $(8 - 2)/8 \cdot 180^\circ = 135^\circ$. Na sliki je kot $\alpha = 45^\circ/2 = 22,5^\circ$, zato je kot ob oglišču B velik $90^\circ + 2\alpha = 135^\circ$, kot ob oglišču C pa izračunamo iz notranjih krovov trikotnika $\triangle ABC$: $\gamma = 180^\circ - 2\alpha = 135^\circ$. Kota sta skladna in ustrezata notranjemu krovu za pravilni osemkotnik.

Vrnimo se nazaj na enakostranični trikotnik v danem kvadratnemu listu papirja. Ali znamo konstruirati največji tak trikotnik – in če da, kako? Recimo, da obstaja tak trikotnik. Najprej premislimo, da mora vsaj eno njegovo oglišče ležati v oglišču kvadrata. Če to ne drži, se trikotnik ne dotika ene stranice kvadrata – ker ima tri stranice, kvadrat pa štiri – recimo spodnje. Potem se z ostalimi tremi oglišči dotika preostalih treh stranic kvadrata, sicer to ne bi bil največji trikotnik – lahko bi ga še povečali. Potisnimo sedaj trikotnik navzdol po kvadratu, dokler se najnižje oglišče na eni od pokončnih stranic kvadrata ne dotakne njegove spodnje stranice – kar se zgodi ravno v oglišču kvadrata. Zaradi simetrije brez škode privzemimo, da je to

spodnje levo oglišče.



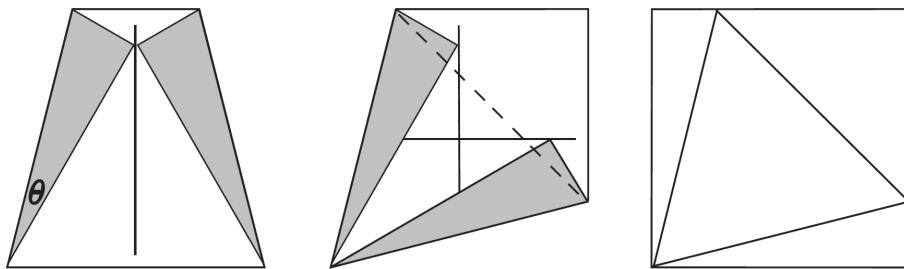
Slika 29: Lega največjega enakostraničnega trikotnika znotraj kvadrata.

Predpostavimo, da ima kvadrat stranico dolžine 1 in naj bo θ kot med spodnjima stranicama kvadrata in trikotnika, kot kaže slika 29. Naj bo x dolžina stranice trikotnika. Iščemo tak kot θ , da bo ploščina trikotnika največja. Ker je notranji kot trikotnika velik 60° , je kot θ zaradi simetrije omejen z $0 \leq \theta \leq 15^\circ$. Ob upoštevanju $x = 1/\cos \theta$ je njegova ploščina

$$P = \frac{\sqrt{3}}{4}x^2 = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta}.$$

Funckijo bi lahko odvajali in preko iskanja njenega maksimuma izrazili kot, Hull pa v [21, str. 11] predlaga enostavnnejšo rešitev. Ker je $\cos x$ na intervalu $[0^\circ, 15^\circ]$ oz. $[0, \pi/12]$ pozitivna in padajoča, je njena obratna vrednost naraščajoča, zato je tudi $1/\cos^2 \theta$ naraščajoča funkcija. Ploščina $P(\theta)$ torej narašča in maksimum doseže pri $\theta = 15^\circ$.

Trikotnik je simetričen glede na diagonalo kvadrata. Na sliki 30 (levo) je prikazana konstrukcija kota 15° – spodnje belo območje enakostraničen trikotnik in vsak od pregibov je simetrala kota 30° . Če opravimo taka dva pregiba na sosednjih stranicah, kot kaže slika 30 na sredi, tako dobimo iskani največji enakostranični trikotnik v danem kvadratu.



Slika 30: Konstrukcija največjega enakostraničnega trikotnika znotraj kvadrata.

3.2 Hagovi izreki za prepogibanje kvadrata

S prepogibanjem kvadratnega lista papirja se je veliko ukvarjal Kazuo Haga, sicer japonski profesor biologije. V svojem delu *Origamics: Mathematical Explorations Through Paper Folding* [13] je tako med drugim formuliral tri izreke, ki jih poznamo

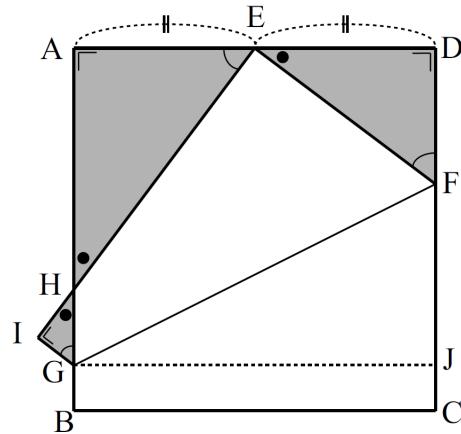
pod imenom *Hagovi izreki*. Pri vsakem od njih gre za konstrukcijo specifičnega pregiba, ki povzroči delitev stranic kvadrata v različnih razmerjih. Vsak izrek posebej bomo najprej formulirali, si slikovno ogledali konstrukcijo in ga dokazali, nato pa si pogledali še nekaj dodatnih lastnosti, ki sledijo iz njega.

Da si olajšamo računanje, predpostavimo, da ima kvadrat, ki predstavlja naš list papirja, stranico dolžine 1. Njegova oglišča označimo s črkami A, B, C in D , začenši v zgornjem desnem oglišču in sledečimi v pozitivni smeri, torej nasprotni smeri urinega kazalca.

3.2.1 Prvi Hagov izrek

Izrek 3.1 (Prvi Hagov izrek). *Zgornjo stranico AD kvadrata $ABCD$ razpolovimo v točki E in s pregibom nanjo položimo oglišče C . S tem na levi in desni stranici kvadrata dobimo tri točke, ki jih označimo z F, G in H (slika 31). Za te točke velja:*

- točka F deli desno stranico v razmerju $3 : 5$,
- točka H deli levo stranico v razmerju $2 : 1$,
- točka H deli spodnjo stranico v razmerju $1 : 5$,
- točke G deli levo stranico v razmerju $7 : 1$.



Slika 31: Konstrukcija pregiba iz prvega Hagovega izreka. Vzeto iz [13, str. 4].

Dokaz. Kot kaže slika 31, označimo še točki I in J . Najprej lahko opazimo, da pregib iz izreka povzroči nastanek treh podobnih pravokotnih trikotnikov, ki so na sliki 31 pobarvani sivo. Za vsakega od njih lahko določimo dolžine njegovih stranic.

Začnimo s trikotnikom $\triangle DEF$. Ker je E razpolovišče stranice AD , je $|DE| = 1/2$. Če drugo kateto DF označimo z a , je hipotenuza EF dolga $1 - a$, saj $|DF| + |EF| = |DF| + |FC| = 1$ po konstrukciji. Iz Pitagorovega izreka nato izračunamo $a = 3/8$. Torej točka F res deli stranico CD v razmerju $3 : 5$.

Iz razmerja podobnih trikotnikov $\triangle DEF$ in $\triangle AHE$ dobimo

$$\frac{|AH|}{|AE|} = \frac{|DE|}{|DF|}, \text{ torej } |AH| = \frac{|AE| \cdot |DE|}{|DF|} = \frac{1/2 \cdot 1/2}{3/8} = \frac{2}{3}.$$

Točka H res deli stranico AB v razmerju $2 : 1$. Drugače povedano – s prvim Hagovim izrekom znamo poljubno daljico razdeliti na tri skladne dele.

Sedaj lahko izračunamo dolžino hipotenuze EH trikotnika $\triangle AHE$. Iz Pitagorovega izreka sledi $|EH| = 5/6$ (in posledično iz $|EI| = 1$ še $|HI| = 1/6$), torej točka H res deli spodnjo stranico v razmerju $1 : 5$.

Za izračun dolžine daljice BG , ki je po konstrukciji enaka dolžini katete GI , si spet pomagamo z razmerji podobnih trikotnikov; tokrat vzamemo trikotnika $\triangle IHG$ in $\triangle AHE$. Iz razmerja

$$\frac{|GI|}{|HI|} = \frac{|AE|}{|AH|} \quad \text{sledi} \quad |BG| = |GI| = \frac{|AE| \cdot |HI|}{|AH|} = \frac{1/2 \cdot 1/6}{2/3} = \frac{1}{8},$$

torej točka G res deli stanico AB v razmerju $7 : 1$.

Za vajo lahko izračunamo še preostale dolžine daljic:

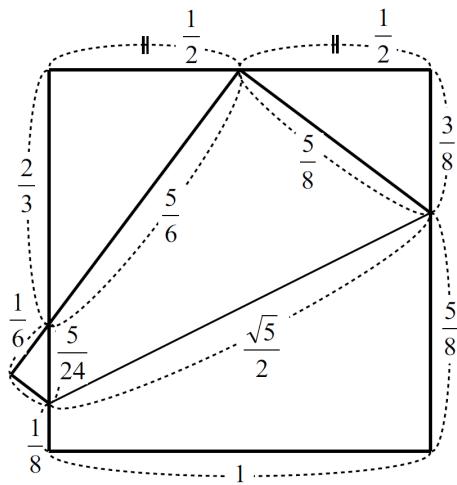
$$|GH| = |AB| - |AH| - |BG| = 1 - \frac{2}{3} - \frac{1}{8} = \frac{5}{24},$$

$$|CJ| = |BG| = \frac{1}{8},$$

$$|FJ| = |CD| - |DF| - |CJ| = 1 - \frac{3}{8} - \frac{1}{8} = \frac{1}{2},$$

$$|FG| = \sqrt{|GJ|^2 + |FJ|^2} = \sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{5}}{2}.$$

S tem so znane vse dolžine daljic, na katere pregib iz prvega Hagovega izreka razdeli stranice enotskega kvadrata. Na sliki 32 je tako povzetek naših ugotovitev.

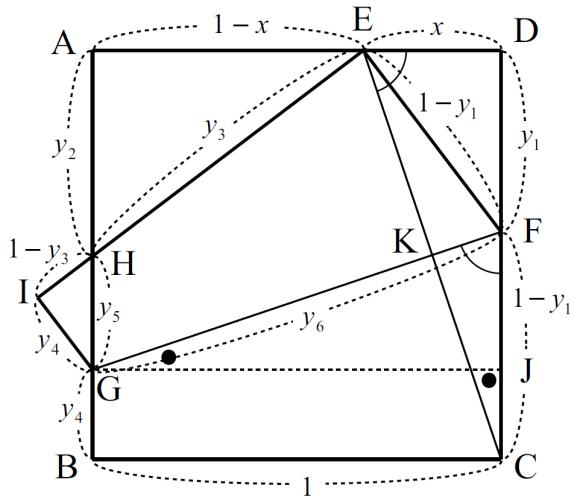


Slika 32: Dolžine daljic po prvem Hagovem izreku. Vzeto iz [13, str. 7].

Izrek lahko tudi posplošimo, če za točko E ne vzamemo razpolovišča, temveč poljubno točko na daljici AD . Naj bo $x = |ED|$. Nastale točke označimo kot prej, dolžine nastalih daljic pa z y_1 do y_6 , kot kaže slika 33.

Za vsak $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ poiščimo sedaj vrednost y_i v odvisnosti od x . Kot prej najprej opazimo, da imamo zopet tri podobne pravokotne trikotnike. Iz Pitagorovega izreka za pravokotni trikotnik $\triangle EDF$ sledi

$$y_1 = (1 - x^2)/2,$$



Slika 33: Oznake dolžin iz prvega Hagovega izreka v splošnem. Vzeto iz [13, str. 9].

iz razmerja podobnih pravokotnih trikotnikov $\triangle EDF$ in $\triangle HAE$ pa izračunamo

$$y_2 = \frac{x(1-x)}{y_1} = \frac{2x}{1+x} \quad \text{in} \quad y_3 = \frac{(1-y_1)(1-x)}{y_1} = \frac{1+x^2}{1+x}.$$

Pregib FG je po konstrukciji simetrala daljice CE , torej pravokotna nanjo, iz česar sledi, da sta trikotnika $\triangle CKF$ in $\triangle CDE$ podobna in kota $\angle DEC$ in $\angle KFC$ skladna. Zato sta skladna tudi trikotnika $\triangle CDE$ in $\triangle GJF$, torej $|FJ| = x$. Posledično je

$$y_4 = |CJ| = 1 - (y_1 + x) = \frac{(1-x)^2}{2} \quad \text{in} \quad y_5 = 1 - y_2 - y_4 = \frac{(1-x)(1+x^2)}{2(1+x)}.$$

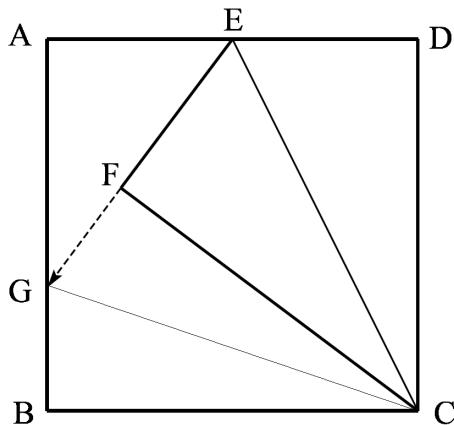
Na koncu še s ponovno uporabo Pitagorovega izreka izračunamo

$$y_6 = \sqrt{|GJ|^2 + |FJ|^2} = \sqrt{1+x^2}.$$

Splošne vrednosti dolžin y_i mogoče niso najlepše, vendar pri marsikateri izbiri števila $x \in (0, 1)$ dobimo lepe številke. Najbolj so zanimiva recipročna števila naravnih števil. Vemo že, da pri izbiri $x = 1/2$ lahko dobimo števila $1/3, 1/6, 1/8$, pri izbiri $x = 1/4$ in $x = 3/4$ dobimo še $2/5$ (in iz tega z razpolovitvijo $1/5$) in $1/7$. Računanje prepuščamo bralcu, se pa na tej točki lahko vprašamo, ali za vsak $n \in \mathbb{N}$ obstaja primeren x , da lahko preko neke dolžine y_i ali $1 - y_i$ in preko postopkov za konstrukcijo že znanih razmerij konstruiramo dolžino $1/n$. Odgovor je pritrden, enostaven razmislek pa sledi v razdelku 3.3.

3.2.2 Drugi Hagov izrek

Izrek 3.2 (Drugi Hagov izrek). *Zgornjo stranico AD kvadrata $ABCD$ razpolovimo v točki E in opravimo pregib skozi točko E ter oglišče C . Točka D se tako preslikava v točko F (slika 34). Če stranico EF podaljšamo do leve stranice kvadrata, jo presečišče G razdeli v razmerju $2 : 1$.*



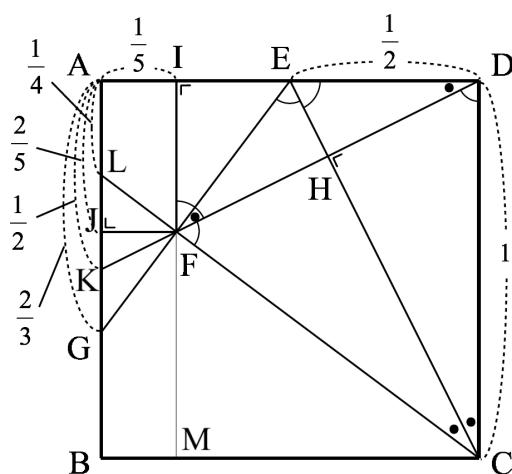
Slika 34: Konstrukcija pregiba iz drugega Hagovega izreka. Vzeto iz [13, str. 12].

Dokaz. Opazimo lahko, da sta trikotnika $\triangle BCG$ in $\triangle FCG$ skladna, saj imata skladni daljšo kateto in hipotenuzo ter pravi kot nasproti hipotenuze. Označimo $x = |GB| = |GF|$. Zapišimo Pitagorov izrek za pravokotni trikotnik $\triangle AGE$:

$$\left(x + \frac{1}{2}\right)^2 = (1 - x)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ in izračunamo } x = \frac{1}{3},$$

torej točka G res deli stranico AB v razmerju $2 : 1$. \square

S tem smo zopet dobili način razdelitve dolžine na tri enake dele, a tu zanimivih razmerij še ni konec. Poglejmo si še, v kakšen razmerju nam stranice deli točka F in točke, ki jih dobimo s podaljšanjem dolžin FD in FC do leve stranice. Označimo nove točke H, I, J, K in M , kot kaže slika 35.



Slika 35: Razdalje po drugem Hagovem izreku. Preurejeno iz [13, str. 15].

Po konstrukciji pregiba velja $FD \perp CE$, iz česar dobimo podobne pravokotne trikotnike $\triangle CDE$, $\triangle CFE$, $\triangle DAK$, $\triangle DHE$, $\triangle FHE$, $\triangle DIF$. Prvi trije od našteti so celo skladni, prav tako je skladen tudi sledeči par. Le trikotnik $\triangle DIF$ nima

skladnega para. Iz sledečih razmerij izračunamo

$$\begin{aligned}|DH| &= \frac{|DE| \cdot |CD|}{|CE|} = \frac{1}{\sqrt{5}}, \quad \text{torej } |DF| = 2|FH| = \frac{2}{\sqrt{5}}, \\|DI| &= \frac{|DF| \cdot |CD|}{|CE|} = \frac{4}{5}, \quad \text{torej } |AI| = \frac{1}{5}, \\|FI| &= \frac{|DI| \cdot |DE|}{|CD|} = \frac{2}{5} \quad \text{in} \\|AK| &= |DE| = \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

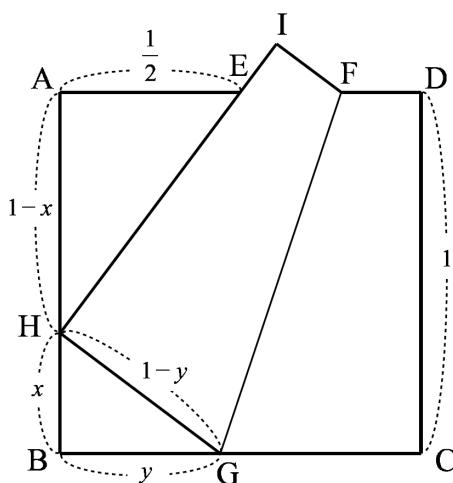
Iz podobnih trikotnikov $\triangle BCL$ in $\triangle MCF$ sledi še

$$|BL| = \frac{|BC| \cdot |FM|}{|CM|} = \frac{3}{4}, \text{ tojej } |AL| = |AB| - |BL| = \frac{1}{4}.$$

Torej nam drugi Hagov izrek poleg konstrukcije števil $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ poda tudi direktno konstrukcijo števil $\frac{1}{5}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{3}{5}$ in $\frac{4}{5}$.

3.2.3 Tretji Hagov izrek

Izrek 3.3 (Tretji Hagov izrek). *Zgornjo stranico AD kvadrata $ABCD$ razpolovimo v točki E in opravimo pregib, ki točko E položi na desno stranico in hkrati oglišče C na levo stranico (slika 36). Njena slika H levo stranico deli v razmerju $2 : 1$.*



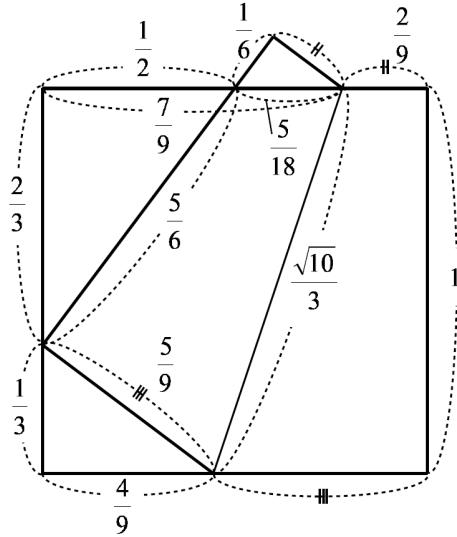
Slika 36: Konstrukcija pregiba iz tretjega Hagovega izreka. Vzeto iz [13, str. 18].

Dokaz. Označimo še točke E, F, G , in I ter uvedimo $x = |BH|$ in $y = |BG|$, kot kaže slika 36. Zaradi prepogiba je $|GH| = |CG| = 1 - y$. Iz Pitagorovega izreka za pravokotni trikotnik $\triangle BGH$ ter razmerja za podobna trikotnika $\triangle BGH$ in $\triangle AHE$ dobimo sistem enačb

$$x^2 + y^2 = (1-y)^2 \quad \text{in} \quad \frac{1/2}{1-x} = \frac{x}{y},$$

iz katerih izračunamo $x = \frac{1}{3}$ in $y = \frac{4}{9}$. Torej točka H res deli stranico AB v razmerju $2 : 1$. \square

Kot pri prejšnjih dveh izrekih bi lahko poračunali še preostale dolžine daljic. To za vajo prepuščamo bralcu, ki se lahko o svojih rezultatih prepriča s sliko 37.



Slika 37: Dolžine daljic po tretjem Hagovem izreku. Vzeto iz [13, str. 19].

Pri vseh treh Hagovih izrekih gre torej za prepogib, ki ali gre skozi središče zgornejne stranice AD ali stranico CD kvadrata $ABCD$ položi nanj. V vsakem primeru nam konstrukcija poda točko na levi stranici AB , ki jo deli v razmerju $2 : 1$, torej sedaj zmoremo (na več načinov) poljubno daljico razdeliti na tri skladne dele. Če popustimo pogoj, da uporabljamo središče stranice AD , lahko z izbiro poljubne točke na tej stranici kvadrata izreke posplošimo in dobimo več zanimivih razmerij, kot se izkaže, celo razmerje $n : 1$ za poljuben $n \in \mathbb{N}$.

Avtor Haga je svoje izreke preizkusil tudi na *srebrnih pravokotnikih*⁷ in tako prišel do novih načinov razdelitev na 9, 14, 16 in še več različnih delov. Tu se s tem ne bomo ukvarjali, zato naj si bralec, ki ga zanima več, to pogleda v [13, str. 21–32].

3.3 Razdelitev daljice na n skladnih delov

Stranico kvadrata želimo razdeliti na n enakih delov, kjer je $n \in \mathbb{N}$ poljuben. Za $n = 2^t$, kjer je $t \in \mathbb{N}_0$, je to čisto enostavno, saj samo prepolavljam razdalje med pregibi, dokler ne dosežemo cilja. Če je n sod, vendar ni potenca 2, torej $n = 2^t(2m + 1)$, kjer sta $t, m \in \mathbb{N}$, stranico najprej razdelimo na 2^t delov, nato pa moramo vsakega izmed njih razdeliti na $2m + 1$ (liho število) delov. Izziv tega problema je torej v razdelitvi daljice na liho število delov. Ko bomo to zmogli, jo bomo znali razdeliti na n delov za vsak $n \in \mathbb{N}$.

V prejšnjem razdelku so nam Hagi izreki podali razdelitev stranice kvadrata na tri, pet, sedem in devet delov. Vendar iščemo metodo, ki nam stranico razdeli na n delov za splošen lih $n \in \mathbb{N}$. Spomnimo se, da smo en tak postopek že spoznali

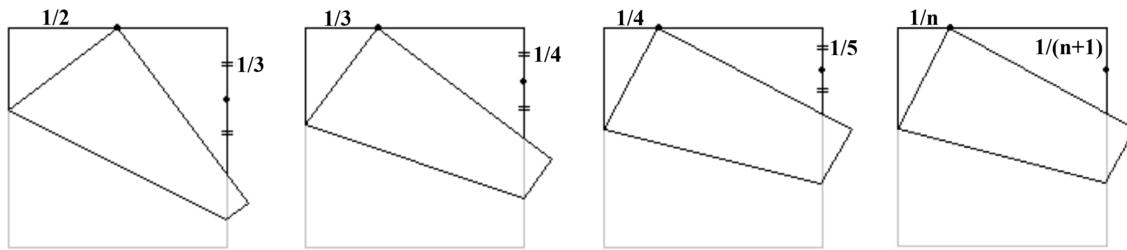
⁷To so pravokotniki, ki imajo stranice v razmerju $1 : \sqrt{2}$. Lastnost tega razmerja je, da če tak pravokotnik prepoloviš po daljši stranici, dobiš nov, za pol manjši srebrni pravokotnik. Primer takega pravokotnika je kar A4 list papirja – prepričaš se lahko tako, da krajo stranico prepognes na daljšo, da dobiš diagonalo kvadrata, in preveriš, da je ta pregib enako dolg kot daljša stranica. To je enak princip kot pri zlatih pravokotnikih, kjer je razmerje stranic v zlatem rezu.

– v dokazu izreka 2.29 smo za poljuben $a \in \mathbb{R}$ znali konstruirati razdaljo $1/a$, kar bi lahko uporabili za razdelitev neke doljice na a enakih delov – konstruirano razdaljo $1/a$ bi a -krat prenesli naprej. Načinov reševanja tega problema pa se je skozi zadnja desetletja oblikovalo še veliko več; tu bomo spoznali še dve metodi.

Metoda po posplošenem prvem Hagovem izreku

Spomnimo se prvega Hagovega izreka, kjer nam prepogib oglišča B na središče doljice AD v točki H na doljici AB povzroči njen razdelitev v razmerju $2 : 1$. Nato smo izrek posplošili in namesto središča zgornje stranice izbrali poljubno točko, ki je za x odmaknjena od oglišča D (slika 33). Pri tem smo med drugim izračunali razdaljo $y_2 = |HA| = 2x/(1+x)$.

Razveseli nas, da pri $x = 1/n$ dobimo ravno $y_2 = 2/(n+1)$, kar je dvakratnik števila $1/(n+1)$. Če torej znamo zgornjo stranico razdeliti v razmerju $(n-1) : 1$, nam središče doljice HA levo stranico razdeliti v razmerju $n : 1$. Na sliki 38 je prikaz za $n = 2, 3, 4$ in splošen n (pri tem se sicer na zgornjo stranico prepogne spodnje levo oglišče, zato je to zrcalna različica slike, kot smo je vajeni). Po indukciji (prvi Hagov izrek je baza indukcije pri $n = 2$) je to še ena metoda za razdelitev doljice na poljubno število skladnih delov preko prepogibanja kvadratnega lista papirja.



Slika 38: Konstrukcije razmerij po posplošenem prvem Hagovem izreku.

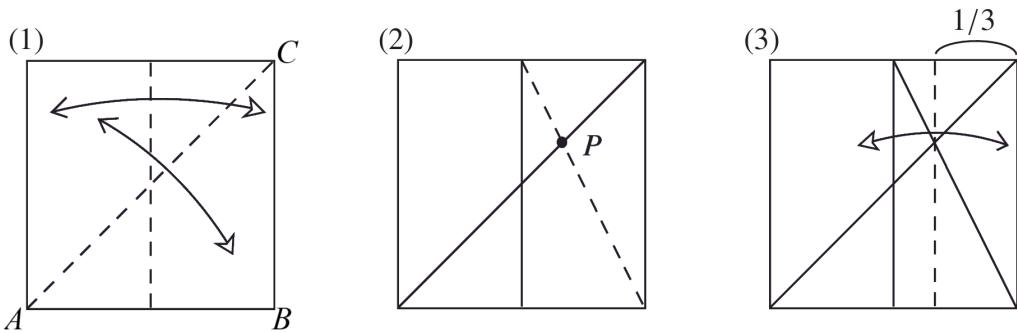
Metoda križajočih se diagonal

Metoda nima uradnega prevoda niti uradnega imena, jo pa tako imenuje Robert J. Lang v svojem članku [27]. Njena konstrukcija je prikazana na sliki 39. Najprej kvadrat dvakrat prepognemo na pol – enkrat po diagonali skozi oglišči A in C in drugič po vertikali. Nato prepognemo po diagonali (skozi oglišče B) še desni pokončen pravokotnik. Presečišče obeh diagonal označimo s točko P in naredimo skoznjo prepogib, ki je pravokoten na horizontalno stranico kvadrata.

Trditev 3.4. *Zadnji pregib iz zgornjega opisa konstrukcije razdeli horizontalno stranico kvadrata v razmerju $2 : 1$.*

Dokaz. Dokazujemo lahko na več načinov:

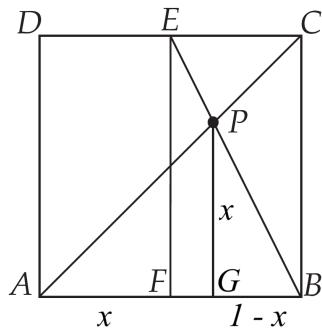
1. *Analitičen pristop:* Kvadrat postavimo v evklidsko ravnino tako, da leži oglišče A v koordinatnem izhodišču in oglišče B v točki $(1, 0)$. Obe diagonali izrazimo z enačbama premic. Glavna diagonala ima enačbo $y = x$, diagonala pravokotnika pa $y = -2x + 2$. Točka P je njuno presečišče in ima tako koordinati $(2/3, 2/3)$.



Slika 39: Konstrukcija po metodi križajoih se diagonal za $n = 3$. Preurejeno iz [21, str. 37].

2. *Preko podobnih trikotnikov:* Z opisanimi prepogibi v tem kvadratu konstruiramo več trikotnikov. Njihova oglišča označimo tako, kot kaže slika 40. Iz podobnosti trikotnikov $\triangle AGP$ in $\triangle ABC$ sledi, da je trikotnik $\triangle AGP$ enakokrak. Naj bo dolžina njegovih krakov x . Potem je $|AG| = |GP| = x$ in $|GB| = 1 - x$. Iz podobnosti trikotnikov $\triangle EFB$ in $\triangle PGB$ sledi

$$\begin{aligned} \frac{|EF|}{|FB|} &= \frac{|PG|}{|GB|}, \\ \frac{1}{\frac{1}{2}} &= \frac{x}{1-x}, \\ x &= \frac{2}{3}. \end{aligned}$$



Slika 40: Dokaz metode križajočih se diagonal za $n = 3$. Preurejeno iz [21, str. 38].

□

Po konstrukciji pregiba, ki zgornjo stranico kvadrata razdeli v razmerju $2 : 1$, levi pravokotnik (s stranico AG) po vertikali prepognemo še na pol in tako stranico kvadrata razdelimo na tri enake dele. Preidimo sedaj iz $n = 3$ na višje število delov.

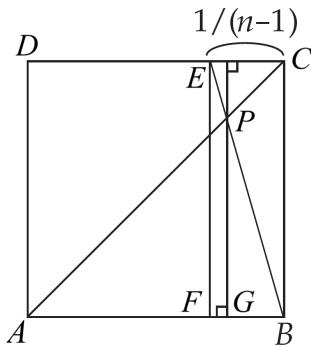
Razdelitev stranice kvadrata na štiri dele je že znana – kvadrat v vertikalni smeri dvakrat prepognemo na pol.

Stranico razdelimo na pet delov na podoben način kot na tri. Naredimo enak pregib po glavni diagonali, nato pa zgornjo stranico razdelimo v razmerju $3 : 1$

(na primer preko razdelitve na štiri dele). S tem smo na desni strani kvadrata dobili pokončen pravokotnik s horizontalno stranico, dolgo četrt stranice kvadrata. Naslednji pregib je, kot prej, diagonala tega pravokotnika (tista skozi oglišče B). Presečišče te in glavne diagonale je točka, ki je od desne stranice oddaljena za $1/5$ (dokaz je analogen tistemu za trditev 3.4, pri čemer je tu $|FB| = 1/4$ in posledično $x = 4/5$). Naredimo vertikalni pregib skozi točko P in s tem zgornjo stranico kvadrata razdelimo v razmerju $4 : 1$. Na koncu še levi del te stranice razdelimo na štiri dele. S tem smo celotno stranico razdelili na pet skladnih delov.

Zgornji postopek lahko posplošimo na poljuben $n \in \mathbb{N}$. Kot smo videli v konkretnih primerih za $n = 3$ in 5 , smo si pomagali z vnajprejšnjo razdelitvijo stranice na $n - 1$ število enakih delov, kar že znamo storiti. Dokaz naslednje trditve bo tako temeljil na indukciji.

Trditev 3.5 (Metoda križajočih se diagonal za splošen n). *Naj bo $n \in \mathbb{N}, n > 2$. Kvadrat $ABCD$ s stranico dolžine 1 prepognemo po diagonali AC , potem pa stranico DC s točko E razdelimo v razmerju $(n - 2) : 1$. Naredimo pregib novonastalega pravokotnika skozi točki B in E (slika 41). Presečišče te in glavne diagonale je točka P , ki je od desne stranice kvadrata oddaljena za $1/n$.*



Slika 41: Konstrukcija po metodi križajočih se diagonal za splošen n . Preurejeno iz [21, str. 38].

Dokaz. Za $n = 1$ in $n = 2$ ni kaj dokazovati – v prvem primeru pregiba sploh ni, v drugem primeru stranico prepolovimo.

Baza indukcije: Po trditvi 3.4 že vemo, da trditev drži za $n = 3$ (tudi za 5).

Indukcijska predpostavka: Predpostavimo, da znamo stranico razdeliti na $n - 1$ enakih delov.

Indukcijski korak: Dokazujemo, da znamo stranico razdeliti na n enakih delov. Po navodilih za konstrukcijo iz trditve konstruiramo točko P in pri tem označimo še točke E, F in G , kot kaže slika 41. Potem je dokaz posplošena različica tistega za trditev 3.4:

1. *Analitičen pristop:* Naj bo oglišče A koordinatno izhodišče in oglišče B točka $(1, 0)$. Premica, ki je nosilka diagonale AC , ima tako enačbo $y = x$, nosilka diagonale CE pa $y = -(n-1)x + (n-1)$. Točka P je njuno presečišče in ima tako koordinate $((n-1)/n, (n-1)/n)$. Torej je od desne stranice kvadrata res oddaljena za $1/n$.

2. *Preko podobnih trikotnikov:* Trikotnik $\triangle AGP$ je enakokrak in naj bo $|AG| = |GP| = x$. Iz razmerij dolžin stranic podobnih trikotnikov $\triangle EFB$ in $\triangle PGB$ sledi

$$\begin{aligned}\frac{|EF|}{|FB|} &= \frac{|PG|}{|GB|}, \\ \frac{1}{\frac{1}{n-1}} &= \frac{x}{1-x}, \\ x &= \frac{n-1}{n}.\end{aligned}$$

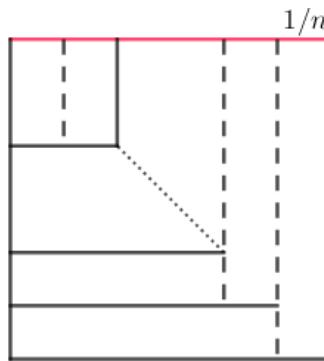
Točka P je od desne stranice kvadrata res oddaljena za $1 - x = 1/(n+1)$.

□

Posledica 3.6. *Poljubno daljico znamo razdeliti na n skladnih delov za vsak $n \in \mathbb{N}$.*

Dokaz. Vzemimo neko daljico poljubne dolžine. Ker znamo konstruirati pravokotnice skozi točke in prenašati razdalje, lahko konstruiramo kvadrat, katereda zgornja stranica dana daljica. Po zgornji trditvi jo znamo razdeliti v razmerju $(n-1) : 1$ za vsak $n \in \mathbb{N}$. Potem moramo njen daljši del razdeliti na $n-1$ skladnih delov. To storimo na enak način kot prej – konstruiramo manjši kvadrat s to novo stranico in ponovimo postopek. Ustavimo se, ko na nekem koraku stranico kvadrata razdelimo v razmerju $1 : 1$ (slika 42). Takrat bo zgornja stranica oz. dana daljica razdeljena na n skladnih delov.

□



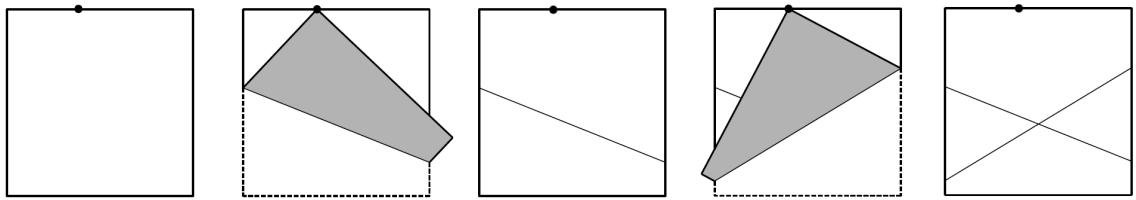
Slika 42: Razdelitev poljubne stranice (označena z rdečo) na poljubno število skladnih delov.

Do zdaj smo imeli metode z razdelitvijo preko prepogibanja kvadratnega lista papirja. Za razdelitev preko pravokotnika je prav tako veliko že razvitih konstrukcij, ki nam njegovo stranico razdelijo na poljubno število skladnih delov. V tej nalogi se s tem ne bomo ukvarjali, bralec pa je povabljen, da si več ogleda v [13, str. 107–134].

3.4 X-pregibi

Poglejmo si še eno zanimivo lastnost, ki jo je odkril Haga in ki izhaja iz prepogibanja kvadrata po principu njegovega prvega izreka (glej [13, str. 33–44]). Potek konstrukcije je sledeč (slika 43):

1. Na zgornji stranici kvadrata izberemo poljubno točko.
2. Levo spodnje oglišče prepognemo na izbrano točko.
3. Papir razgrnemo in opazimo pregib.
4. Nato na izbrano točko prepognemo še desno spodnje oglišče.
5. Papir razgnemo in opazimo nov pregib.

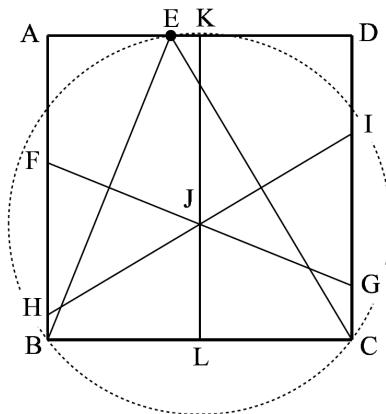


Slika 43: Potek konstrukcije X -pregibov. Predelano iz [13, str. 34].

Par pregibov, ki smo ju dobili po opravljenem postopku, po videzu spominja na črko X , zato ju avtor imenuje kar X -pregiba.

Bralec je povabljen, da za več različnih točk na zgornji stranici kvadrata opravi pripadajoče X -pregibe. Nato pa naj kvadrat prepogne še na pol po vertikali. Mogoče ga bo presenetilo, da le-ta vedno poteka skozi presečišče X -pregibov!

V resnici to ni težko dokazati. Uvedimo najprej označke točk, kot kaže slika 44. Pri tem je E poljubna izbrana točka, gledamo pa trikotnik $\triangle BCE$. Po konstrukciji

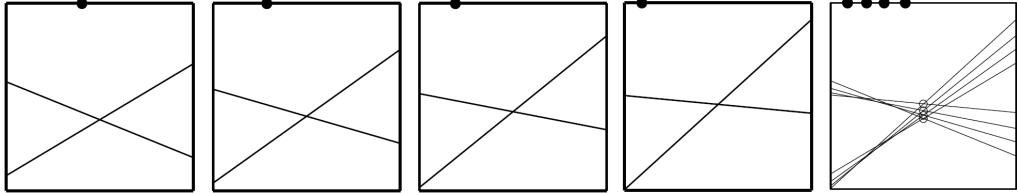


Slika 44: Dokaz, da se X -pregiba in navpična simetrala kvadrata sekajo v isti točki. Vzeto iz [13, str. 38].

je pregib FG po konstrukciji simetrala njegove stranice BE , pregib HI simetrala stranice CE in pregib KL simetrala stranice BC in hkrati navpična simetrala kvadrata $ABCD$. Vemo, da se simetrale stranic trikotnika sekajo v skupni točki, torej smo s tem še matematično potrdili zgornjo opazko iz konstrukcije.

Naj bo J presečišče simetral stranic trikotnika $\triangle BCE$. Potem je to hkrati tudi središče njegove očrtane krožnice, kot je načrtana na sliki 44. Posledično so seveda razdalje oglišč B, C in E do točke J polmeri krožnice, torej so med seboj skladne.

Bralec naj sedaj vzame vse svoje kvadratne liste papirja, na katere je konstruiral različne X -pregibe, in jih zloži drug na drugega. Opazka, da presečišča pregibov ležijo na isti premici, ni presenetljiva, saj smo ravnokar premislili, da vsako tako presečišče leži n anavpični simetrali kvadrata. Bolj je zanimiva opazka, da nobeno od teh presečišč ne leži v zgornji polovici kvadrata (slika 45).



Slika 45: Primeri X -prepogibov in njihova unija. Predelano iz [13, str. 36].

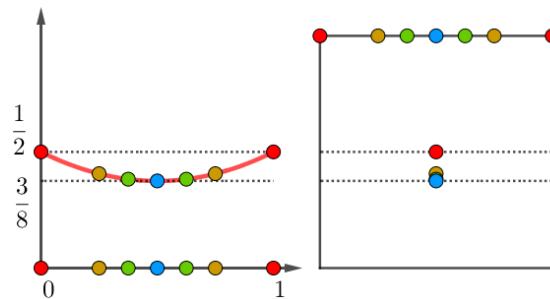
Kvadrat lahko postavimo v koordinatni sistem z oglisčem B v izhodišču in oglisčem A v točki $(0, 1)$. Če naj bo $E = (a, 1)$ poljubna točka na stranici AD . Ohranimo oznake točk s slike 44. Premici, ki predstavljata X -pregiba FG in HI , imata enačbi

$$y_{FG} = -ax + \frac{a^2}{2} + \frac{1}{2} \quad \text{in} \quad y_{HI} = (1-a)x + \frac{a^2}{2}.$$

Njuno presečišče je točka J , katere abscisa je $1/2$ po konstrukciji. Vstavimo to v eno izmed enačb premic in dobimo še njeno ordinato, ki je odvisna od a :

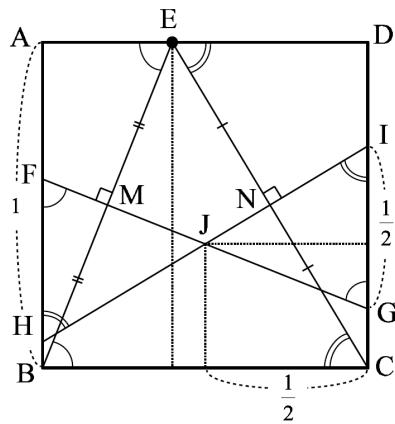
$$y_J(a) = \frac{1}{2} \left(a - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{3}{8}.$$

Ker velja $a \in [0, 1]$, je ordinata točke J omejena z $3/8 \leq y_J \leq 1/2$. Na sliki 46 je levo prikazan graf funkcije $y_J(a)$, na desni pa primerjava ordinat presečišča J glede na izbran a . Najnižja vrednost je dosežena pri $a = 1/2$, torej če za točko E izberemo središče doljice AD , najvišja pa pri $a \in \{0, 1\}$, torej pri izbiri oglisč A oziroma D .



Slika 46: Višina presečišča X -pregibov glede na absciso izbrane točke E .

Tu še ni konec – poglejmo si trikotnika $\triangle FHJ$ in $\triangle GIJ$ (slika 47). Ker imata enak kot v vrhu J in sta osnovnici vzporedni, sta podobna, ker pa točka J razpolavlja pregiba FG in HI , sta celo skladna, torej $|FH| = |GI|$. Ker sta kraka kotov $\angle HFJ$ in $\angle CBE$ paroma pravokotna, sta kota skladna. Na enak način se prepričamo še o skladnosti kotov $\angle GIJ$ in $\angle BCE$. Torej je trikotnik $\triangle BCE$ podoben

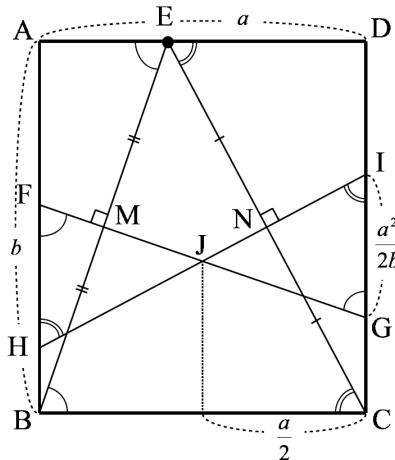


Slika 47: Dokaz, da X -pregiba na vertikalnih stranicah kvadrata odrežeta enaka odseka. Vzeto iz [13, str. 41].

trikotnikoma $\triangle FHJ$ in $\triangle GIJ$. Ker je v trikotniku $\triangle BCE$ njegova višina enako dolga kot osnovica, to velja tudi za ostala trikotnika. Njuna višina je (ker točka J leži na navpični simetrali kvadrata $ABCD$) enaka $1/2$, torej velja

$$|FH| = |GI| = \frac{1}{2}.$$

Haga lastnosti X -pregibov raziskuje tudi na pravokotnikih. Izkaže se, da zanje veljajo enake lastnosti razen zadnje – z daljšanjem daljše stranice pravokotnika se namreč (sicer še vedno skladni) daljici FH in GI vedno krajšata. Matematični premislek prepustimo bralcu, je pa zelo podoben temu za kvadratno različico (slika 48).



Slika 48: X -pregiba v pravokotniku. Vzeto iz [13, str. 44].

4 Reševanje nerešljivih starogrških problemov

Z evklidskimi konstrukcijami se je seveda pojavilo konstruktibilnih ugank – vprašanj, ali sta specifična razdalja oz. kot konstruktibilna (in na kakšnen način) ali ne. Stremeli so k iskanju konstrukcij z evklidskim orodjem in če so kakšen problem uspeli rešiti le z neoznačenim ravnalom in šestilom, so te konstrukcije obravnavali kot “boljše rešitve” [37, str. 36]. Grki pa seveda niso delali le s tem orodjem, ampak so se na primer poslužili tudi označenega ravnila⁸, s katerim so lahko rešili probleme, ki jih sicer niso mogli. Zelo znani so trije t. i. “starogrški” problemi, ki so matematike bremenili več kot tisočletje, začenši s časom Evklida (300 pr. Kr.), nanje pa sta dokončno odgovorila šele Niels Henrik Abel (1802–1829) in Evariste Galois (1811–1832) v začetku 19. stoletja. Gre za sledeče tri probleme:

- **Podvojitev kocke** Imejmo že konstruktibilno kocko. Konstruiraj novo kocko, ki ima dvakrat večji volumen od prve (problem se poenostavi na iskanje konstrukcije števila $\sqrt[3]{2}$).
- **Trisekcija kota** Dan je poljuben konstruktibilen kot. Konstruiraj kot, ki prvega deli na tri skladne dele.
- **Kvadratura kroga** Za dan konstruktibilen krog konstruiraj kvadrat, ki ima enako ploščino kot dani krog (problem se poenostavi na konstrukcije števila $\sqrt{\pi}$).

Z znanjem, ki sta ga znanosti posredovala Abel in Galois, se da pokazati, da ti trije problemi z evklidskim orodjem niso rešljivi. V knjigi o starogrški matematiki od Talesa do Evklida [15, str. 218–270] je zbrano veliko zamisli in konstrukcij grških matematikov, ki so se ukvarjali s temi tremi problemi in evklidsko orodje ne zadostuje za nobeno od najdenih rešitev.

V nalogi smo do sedaj že večkrat omenili, da pa obstajajo origami konstrukcije (celo več metod za isti problem!), ki nam konstruirajo kubični koren origami števila ter razdelijo kot na tri skladne dele. Vse metode, ki bodo sedaj naštete, zahtevajo uporabo Belochinega pregiba (operacije O7), kar je logično, saj so vse ostale origami operacije dovolj za vse evklidske konstrukcije. Žal pa tudi tu ostajamo nemočni glede konstrukcije števila $\sqrt{\pi}$, saj je transcedentno in ga ne moremo konstruirati z nobeno od osnovnih operacij vključno s kvadratnim in kubičnim korenjenjem.

4.1 Podvojitev kocke

Po legendi iz grške mitologije je bog Apolon po oraklju prebivalcem svojega rojstnega otoka Delosa sporočil, da mu morajo, če se želijo znebiti smrtonosne kuge, zgraditi nov oltar v obliki kocke, ki je enak prejšnjemu, le da mora biti dvakrat večji po prostornini. Torej je bilo potrebno konstruirati kocko s stranico, ki je za faktor $\sqrt[3]{2}$ večja od stranice originalne kocke. Po drugi legendi pa naj bi Platon izjavil, da je ta problem, ki so ga prejeli na njegovi Akademiji v Atenah, poslan od bogov samih z namenom osramotiti Grke zaradi njihovega zanemarjanja in prezira do matematike (ker z evklidskim orodjem niso znali konstruirati poljubnih dolžin) [32, str. 29].

⁸Martin v trditvi 10.4 in preko poglavja 9 v [32] dokaže, da so origami števila natanko tista množica števil, ki se jih da konstruirati z ravnalom, ki ima na robu dve oznaki.

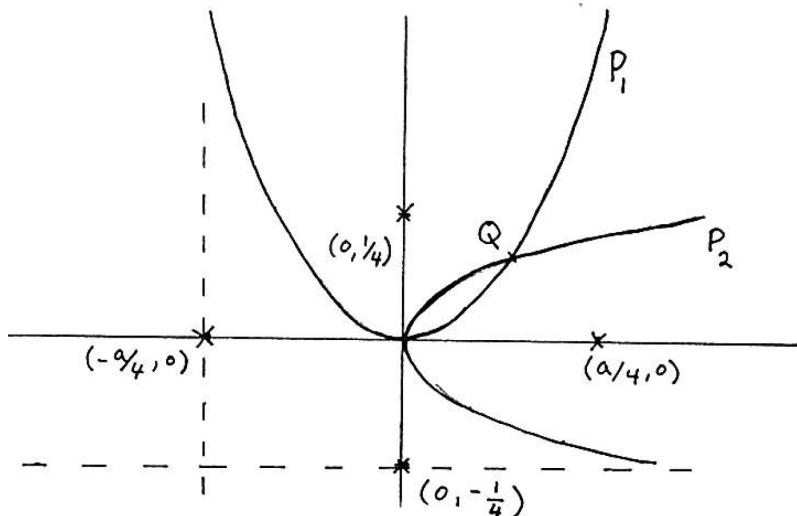
Ne vemo, ali so bili Grki prepričani, da se problema z neoznačenim ravnalom in šestilom ne da rešiti. Vsekakso pa jim je manjkalo algebrsko znanje iz razdelka 2.3.1.

Starogrška rešitev preko presečišča dveh parabol

Grki so problem vseeno uspeli rešiti, čeprav po drugi poti; uporabili so še eno močno matematično orodje – stožnice. Videla v [41] dokaže izrek, ki je identičen izreku 2.36 (ki govori, katera števila so origami števila), le da namesto origamija uporabi stožnice. V bistvu s tem dokaže, da so origami konstrukcije ekvivalentne konstrukcijam s stožnicami!

V istem viru Videla tudi navaja konstrukcijo s parabolami, ki za dano dolžino a podajo dolžino c , za katero velja $c^3 = a$. Njen avtor je Menehmo (prb. 350 pr. Kr.), ki je bil tutor samemu Aleksandru Velikemu. Vzel je sledeči paraboli (slika 49):

- $\mathcal{P}_1 : y = x^2$ z goriščem v točki $(0, \frac{1}{4})$ in premico vodnico $y = -\frac{1}{4}$ in
- $\mathcal{P}_2 : x = \frac{y^2}{a}$ z goriščem v točki $(\frac{a}{4}, 0)$ in premico vodnico $x = -\frac{a}{4}$.



Slika 49: Menehmova konstrukcija števila $\sqrt[3]{2}$ preko parabol. Vzeto iz [41, str. 6].

Presečišči teh dveh parabol dobimo preko enakosti

$$y = x^2 = y^4/a^2,$$

kar nam da enačbo $y(a^2 - y^3) = 0$ z rešitvama $y = 0$ in $y = \sqrt[3]{a^2}$. Presečišči sta torej koordinatno izhodišče in točka $Q = (\sqrt[3]{a}, \sqrt[3]{a^2})$. Njena abscisa je naša rešitev.

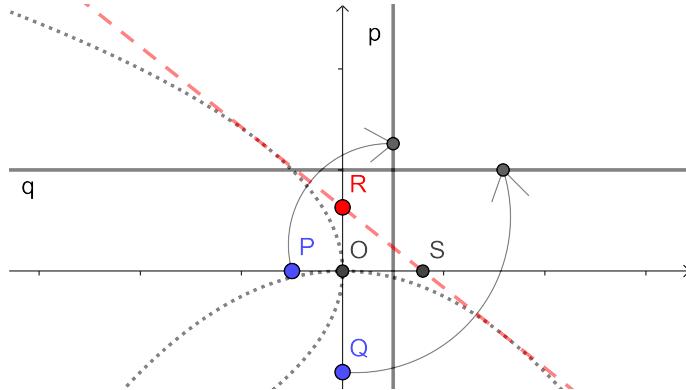
Opomba 4.1. Čeprav je konstrukcija enostavna in logična, je izvedljiva le v teoriji, saj z roko ne znamo natančno risati parabol.

Martinova konstrukcija

George E. Martin v [32, str. 156–157] poda preprosto konstrukcijo števila $\sqrt[3]{k}$ za poljubno origami število k . Tudi on pri tem uporabi dve paraboli, vendar pri postopku

potrebujemo le njuni gorišči in premici vodnici. Ne bomo iskali njunih presečišč, temveč bomo z Belochinim pregibom konstruirali njuno skupno tangento, ki nam bo podala željeni rezultat.

Naj bo $k \in \mathbb{R}$ poljuben. Vzemimo paraboli z goriščema v točkah $P = (-1, 0)$ in $Q = (0, -k)$ ter premici vodnici $p : x = 1$ in $q : y = k$. Paraboli imata skupno gorišče v koordinatnem izhodišču in sta pravokotni druga na drugo, torej imata eno samo skupno tangento. Prepognimo točko P na premico p in točko Q na premico q . Pregib seka y -os v točki R (slika 50).



Slika 50: Martinova konstrukcija števila $\sqrt[3]{k}$.

Trditve 4.2. Točka R iz zgornje konstrukcije ima koordinate $(0, \sqrt[3]{k})$.

Dokaz. Označimo z O koordinatno izhodišče in s S presečišče pregiba z x -oso. Točki R in S sta zaradi take izbire gorišč in premic vodnic ravno središči doljic z enim krajiščem v točkah P in Q ter drugim krajiščem v njunih slikah. Torej velja $PR \perp RS \perp SQ$. Zato so trikotniki $\triangle POR$, $\triangle ROS$ in $\triangle SOQ$ podobni. Iz tega ob upoštevanju $|OP| = 1$ in $|OQ| = k$ dobimo razmerje

$$\frac{|OR|}{|OP|} = \frac{|OS|}{|OR|} = \frac{|OQ|}{|OS|} \implies |OR| = \frac{|OS|}{|OR|} = \frac{k}{|OS|},$$

iz česar sledi

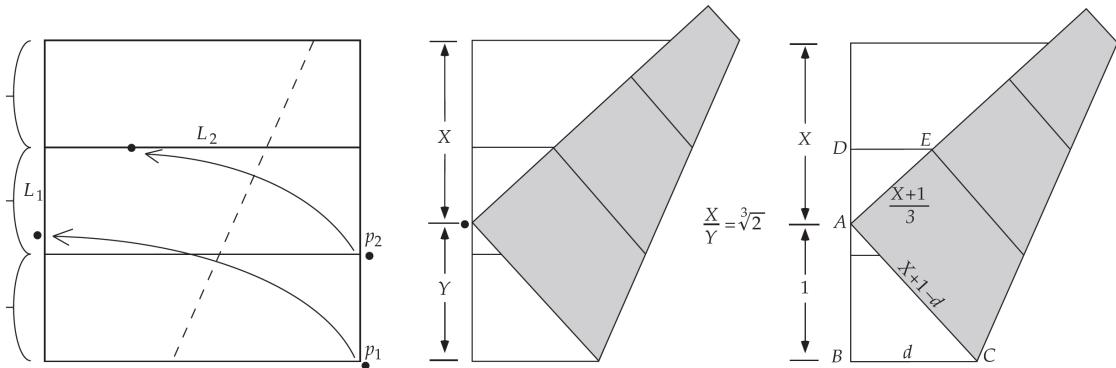
$$|OR|^3 = |OR| \cdot \frac{|OS|}{|OR|} \cdot \frac{k}{|OS|} = k \implies |OR| = \sqrt[3]{k}.$$

□

Opomba 4.3. V razdelku 6.2 bomo spoznali konstrukcijo števila $\sqrt[3]{2}$ preko Belochinega kvadrata, ki je v bistvu poseben primer Martinove konstrukcije.

Messerjeva konstrukcija

Peter Messer v [33] navaja avtorski postopek, ki sicer ne konstruira števila $\sqrt[3]{2}$ kot razdaljo, temveč kot razmerje: kvadraten list papirja po horizontali razdelimo na tri dele (to sedaj že znamo storiti) ter točki p_1 in p_2 s prepogibom položimo na premici L_1 in L_2 , kot kaže slika 51 (levo).



Slika 51: Messerjeva konstrukcija razmerja $\sqrt[3]{2}$. Vzeto iz [21, str. 67–68].

Trditev 4.4. Slika točke p_1 deli levo stranico kvadrata v razmerju $\sqrt[3]{2}$.

Dokaz. Vpeljimo označke X, Y, A, B, C, D, E ter $d = |BC|$, kot kaže slika 51. Dokazati moramo $X/Y = \sqrt[3]{2}$, za lažje računanje pa brez škode privzemimo $Y = 1$. Stranica kvadrata je tako dolga $X+1$, zato je $|AC| = X+1-d$ in $|AE| = (X+1)/3$.

Opazimo podobna pravokotnika $\triangle ABC$ in $\triangle ADE$. Iz trikotnika $\triangle ABC$ s pomočjo Pitagorovega izreka izrazimo $d = (X^2 + 2X)/(2X + 2)$, preko leve stranice pa še $|AD| = X - (X + 1)/3 = (2X - 1)/3$. Iz podobnosti omenjenih trikotnikov izrazimo razmerje katete in hipotenuze z enačbo $|BC|/|AC| = |AD|/|AE|$. Ko vstavimo noter vrednosti, odvisne od X , dobimo enačbo

$$\frac{X^2 + 2X}{X^2 + 2X + 2} = \frac{2X - 1}{X + 1},$$

ki se nam poenostavi prav v $X^3 = 2$. Torej je $X = \sqrt[3]{2}$. \square

Opomba 4.5. Lahko bi rekli, da poleg razmerja v primeru $Y = 1$ Messer konstruira razdaljo $\sqrt[3]{2}$, vendar je razdalja Y odvisna od stranice kvadrata. V tem primeru bi morali vzeti kvadraten list papira s stranico $1 + \sqrt[3]{2}$, za kar bi pač potrebovali že konstrukcijo kubičnega korena števila 2. Da bi pri splošnem kvadratnem listu papirja dobili to dolžino, moramo razdalji X in Y z origamijem še deliti, to pa že znamo.

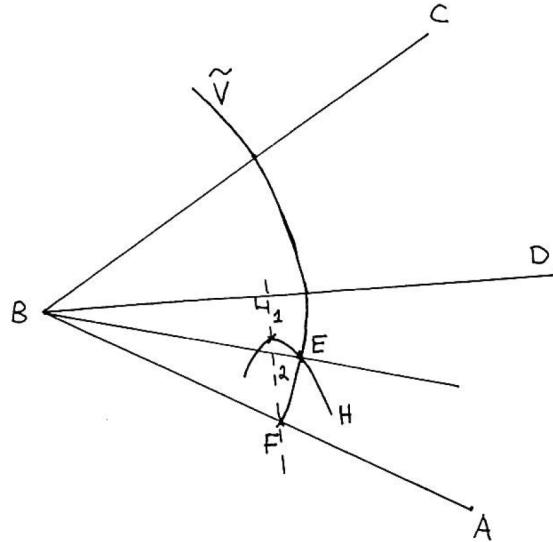
4.2 Trisekcija kota

Kot 90° znamo tretjiniti z neoznačenim ravnalom in šestilom, saj znamo konstruirati kot 30° . Vem pa že, da ne obstaja konstrukcija, s katero na tri skladne kote razdelimo *poljuben* kot – v razdelku 2.3.1 smo dokazali neobstojoj origami konstrukcije za trisekcijo kota 60° .

Starogrška rešitev preko presečišča krožnice in hiperbole

Grki so tudi ta problem uspeli rešiti s stožnicami. Videla v [41, str. 6–7] opisuje Pappusovo konstrukcijo iz 3. stoletja po Kr., ki je tu ne bomo dokazali. Gre za sledeč postopek: Na kraku BA poljubnega kota $\angle ABC$ izberemo poljubno točko F in zarišemo krožnico s središčem v točki B in polmerom BF . Naj bo BD simetrala kota $\angle ABC$. Naj bo točka E presečišče krožnice in hiperbole z ekscentričnostjo 2, ki

ima gorišče v točki F in premico vodnico BD (slika 52). Potem poltrak BE tretjini kot $\angle ABC$.



Slika 52: Pappusova trisekcija kota preko stožnic. Vzeto iz [41, str. 7].

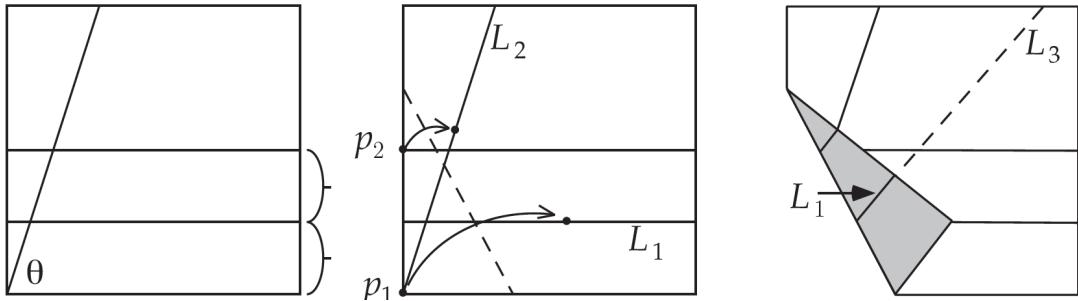
Abejeva metoda

Sledеča metoda ima ime po japonskemu matematiku Hisashiju Abeju, ki jo je odkril v 80-ih letih prejšnjega stoletja. Postopek vključuje Belochin pregib, torej se ga ne da izvesti z evklidskim orodjem, edina pomankljivost metode pa je, da deluje le za ostre kote. Postopek je sledeč:

1. Na kvadratnem listu papirja konstruiramo poljuben kot θ , ki ima vrh v spodnjem desnem vogalu in en krak na spodnji stranici. Nato konstruiramo še dva horizontalna in ekvidistančna pregiba na dnu papirja (slika 53 levo).
2. Točko p_1 prepognemo na spodnji horizontalni pregib, označen L_1 , točko p_2 pa na pošezen krak kota, označen z L_2 (slika 53 na sredi).
3. Preden pregib razgrnemo, podaljšamo pregib L_1 do konca in nov pregib označimo z L_3 (slika 53 desno).
4. Papir razgrnemo in tokrat v spodnji levni kot podaljšamo pregib L_3 .

Opomba 4.6. V 3. koraku opravimo pregib še preden smo razgrnili prvega. To je za nas načeloma prepovedana poteza, vendar bi se dalo L_3 konstruirati tudi po klasični poti z enkratnimi prepogibi – označili bi sliko točke, ki leži hkrati na L_1 in levni stranici kvadrata, ter točko v pregibu iz 2. koraka, ki leži na L_1 in skozinju naredili pregib L_3 – zato zaradi lažje izvedbe brez škode dopustimo tak postopek.

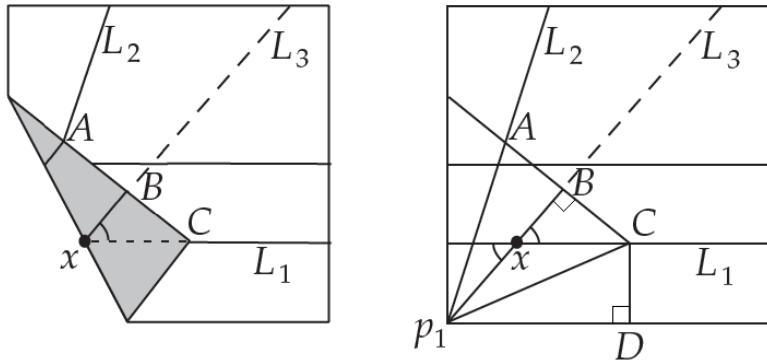
Trditev 4.7. *Pregib L_3 poteka skozi točko p_1 . Kot s krakoma L_2 in L_3 ter vrhom v točki p_1 je velik $\theta/3$.*



Slika 53: Trisekcija kota po Abejevi metodi. Vzeto iz [21, str. 64].

Posledica 4.8. Ko spodnji rob kvadrata prepognemo na pregib L_3 , razdelimo kot θ na tri skladne kote.

Dokaz. Posledica logično sledi, zato dokazujemo le trditev. Označimo z x točko, ki leži na presečišču pregiba L_1 in pregiba iz 2. koraka Abejeve metode. Z A, B , in C označimo še slike točk z leve stranice kvadrata, kot kaže slika 54. Ker je točka



Slika 54: Dokazovanje Abejeve metode. Vzeto in predelano iz [21, str. 65].

C slika točke p_1 in x leži na L_1 , daljica xC leži na L_1 . Po konstrukciji daljica xB leži na L_3 , zato sta kota ob x , ko papir razgrnemo, skladna. Zaradi sovršnosti kotov daljica p_1x leži na L_3 , s čimer je prvi del trditve dokazan.

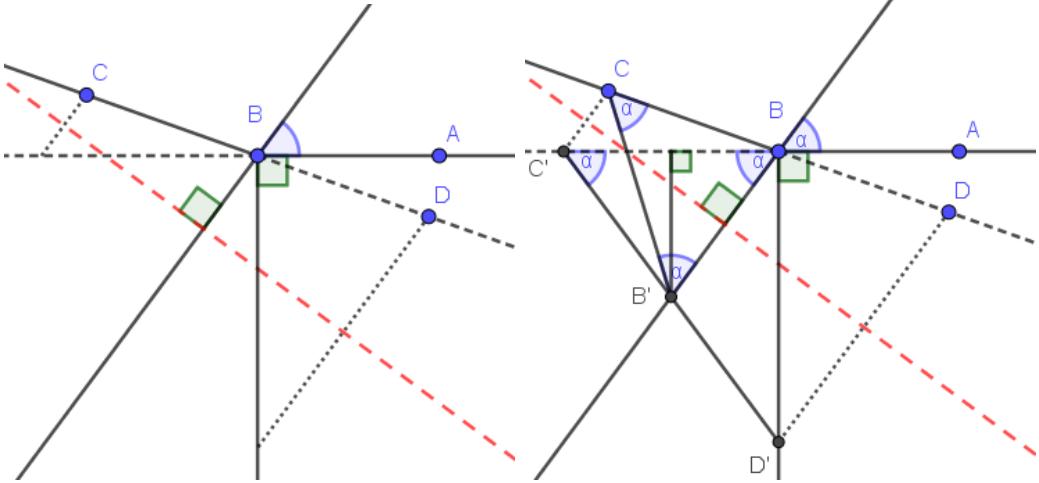
Na razgrnjenem papirju zarišemo (ali prepognemo) še nekaj daljic (slika 54 desno). Ker velja $|AB| = |BC| = |CD|$ in imata pravokotna trikotnika $\triangle p_1AB$ in $\triangle p_1BC$ skupno še drugo kateto, trikotnika $\triangle p_1BC$ in $\triangle p_1CD$ pa skupno hipotenizo, so vsi trije trikotniki skladni z enakim kotom v točki p_1 , torej nam pregiba skozi daljici p_1B (kar je ravno L_3) in p_1C kot θ razdelijo na tri skladne kote. \square

Ker ta postopek deluje le za ostre kote, si poglejmo naslednjo metodo, ki jo lahko uporabljamo tako za ostre kot tudi tope kote.

Justinova metoda

Francoski matematik Jacques Justin za svojo metodo trisekcije ne zahteva kvadratnega lista papirja, ampak je dovolj kakršenkoli list. Lang v [28, str. 34] takole navaja njegovo konstrukcijo:

Na sredo narišemo poljuben kot $\angle ABC$ (oster ali top) in njuna kraka podaljšamo skozi vrh B . Skozi vrh konstruiramo poltrak, pravokoten na krak BA . Točko C prezrcalimo čez vrh v točko D ter nato obe točki prepognemo na nosilko kraka BA in ravno konstruirano pravokotnico, kot kaže slika 55 (levo). Nazadnje na Belochin pregib konstruiramo še pravokotnico skozi točko B .



Slika 55: Justinova trisekcija kota (levo) in njen geometrijski dokaz (desno).

Trditev 4.9. *Kot, ki v točki B oklepata zadnja pravokotnica iz zgornje konstrukcije in krak BA , je tretjina kota $\angle ABC$.*

Dokaz. Označimo z α kot iz trditve. Naj bosta točki C' in D' slike točk C in D , točka B' pa presečišče daljice $C'D'$ s pravokotnico iz trditve. Po konstrukciji Belochinega pregiba je daljica $C'D'$ slika daljice CD , torej je točka B' slika točke B . Točka B' je tako središče daljice $C'D'$ in zato je vzporednica k poltraku BD' skozi točko B' simetrala daljice $C'B$. Trikotnik $\triangle C'B'B$ je tako enakokrak in velja $\angle C'BB' = \angle B'C'B = \alpha$.

Ker sta trikotnika $\triangle C'B'B$ in $\triangle CBB'$ zaradi simetričnosti glede Belochin pregib skladna, velja tudi $\angle B'CB = \angle CB'B = \alpha$. Iz vsote notranjih kotov trikotnike $\triangle CB'B$ sledi $\angle C'BC = 180^\circ - 3\alpha$, torej je $\angle ABC = 180^\circ - \angle C'BC = 3\alpha$. \square

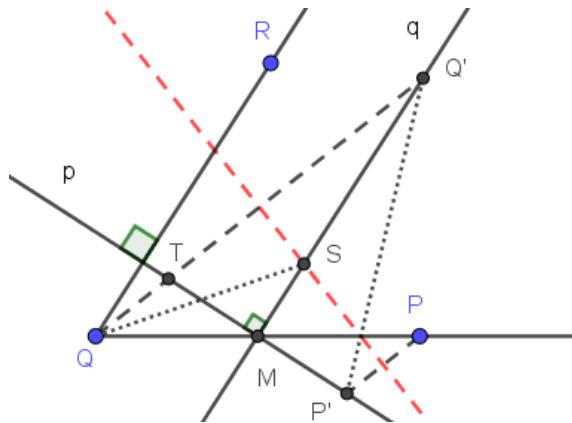
Martinovi konstrukciji za trisekcijo ostrega kota

George E. Martin v [32, poglavje 10] navaja še dve metodi za trisekcijo ostrega kota.

Pri prvi vzamemo oster kot $\angle PQR$ in s točko M označimo središče daljice PQ . Skozi M konstruiramo pravokotnico p na QR , nato pa še pravokotnico na p . Opravimo tisti Belochin pregib (od treh možnih), ki seka daljico PM in točko Q položi na premico q (v točko Q'), točko P pa na premico p (v točko P'). S T označimo presečišče daljice QQ' s premico p in s S presečišče pregiba s premico q (slika 56).

Trditev 4.10. *Daljici QT in QS tretjinita kot $\angle PQR$.*

Dokaz. Ker velja $|QM| = |MP|$, $\angle PMP' = \angle TMQ$ in $QT \parallel PP'$, sta trikotnika $\triangle QMT$ in $\triangle PMP'$ skladna in je $|TM| = |MP'|$. Potem sta skladna tudi pravokotna trikotnika $\triangle TMQ'$ in $\triangle P'MQ'$, zato je $\angle MQ'P' = \angle TQ'M = \angle RQQ'$ (zaradi



Slika 56: Martinov postopek za trisekcijo kota iz [32, str. 154].

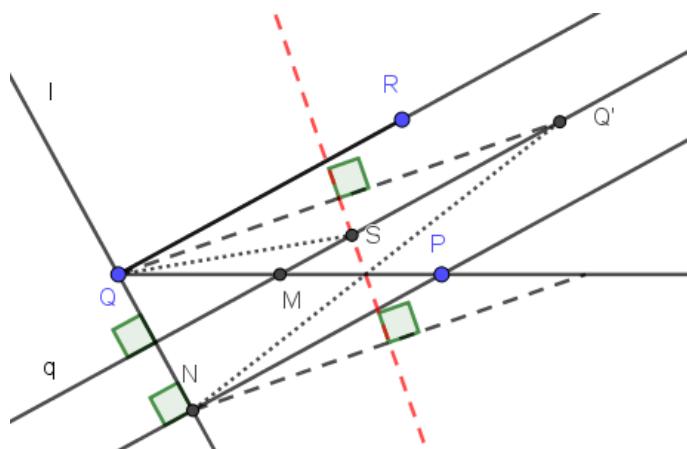
izmeničnih kotov ob vzporednicah QR in q) = $\angle Q'QS$ (ker je trikotnik $\triangle QSQ'$ enakokrak).

Bralec se lahko hitro prepriča, da daljica $Q'P'$ seka pregib ravno v njegovem presečišču z daljico MP (vsi koti ob tem presečišču so zaradi konstrukcija pregiba in sovršnosti skladni). Zato velja še $\angle PQQ' = \angle P'Q'Q$, iz česar sledi

$$\angle MQS = \angle SQT = \angle TQR.$$

□

Druga metoda je prvi zelo podobna. Zopet vzamemo oster kot $\angle PQR$ in s točko M označimo središče doljice PQ . Naj bo l pravokotnica na QR skozi točko Q , točka N nožišče pravokotnice na premico l skozi točko P , s q označimo pa še pravokotnico na premico l skozi točko M . Opravimo tisti Belochin pregib, ki točko Q položi na premico q (v točko Q') in točko N na poltrak QR . Naj bo točka S presečišče pregiba s premico q (slika 57).



Slika 57: Martinov postopek za trisekcijo kota iz [32, str. 158–159].

Trditev 4.11. Daljici QQ' in QS tretjinita kot $\angle PQR$.

Dokaz. Zopet premislimo, da se pregib, poltrak QP in daljica NQ' sekajo v isti točki. Zato je $\angle QQ'N = \angle PQQ'$. Zaradi vzporednosti kraka QR in premice q sta skladna tudi izmenična kota $\angle RQQ'$ in $\angle QQ'S$, z njima pa je zaradi enakokrakosti trikotnika $\triangle QSQ'$ skladen tudi kot $\angle SQQ'$.

Ker velja $|QM| = |MP|$ in $q \parallel NP$, je premica q simetrala daljice QN , torej tudi simetrala kota $\angle QQ'N$. Iz tega sledi

$$\angle MQS = \angle SQQ' = \angle Q'QR.$$

□

5 Pregibanje tangent na stožnice

Iz didaktičnega vidika zelo zanimivo poglavje nam predstavlja konstrukcije tangent na stožnice s prepogibanjem papirja. Vsebina je tu predstavljena tako, da je bralec najprej povabljen, da vzame list papirja in ga prepogiba po navedenih korakih. Po opažanju, kaj se na papirju pri tem prikaže, preidemo na matematični del, kjer dokažemo, da so prepogibi res tangente na določeno stožnico.

Učitelji matematike so povabljeni, da si pri obravnavi stožnic vzamejo čas in pri pouku izvedejo spodnje aktivnosti. Dijaki bodo z veliko verjetnostjo presenečeni nad rezultati zgibanja, kar jih lahko bolj motivira za obravnavo geometričnih lastnosti stožnic. Priporočljiva je tudi izvedba ure v računalniški učilnici, kjer lahko vsak dijak z ustreznim programskim orodjem (npr. Geogebra) sam poskusiti zgraditi opisano konstrukcijo. S tem lahko znanje o stožnicah le še bolj utrditi.

Z origamijem ne moremo konstruirati gladkih krožnih lokov. Kljub temu pa lahko z upoštevanjem določenih korakov konstruiramo premice, ki so tangentne na neko krivuljo. Več takih tangent nam poda nekakšno lomljenko, če pa bi konstrukcije pregibov ponavljali v nedogled, bi teoretično v limiti res dobili gladko krivuljo.

Definicija 5.1. Naj bo dana družina krivulj s parametrizacijo $F(t, x, y) = 0$, kjer je t njen parameter in F diferenciabilna za vsak t . *Ovojnica* te družine je krivulja, ki je tangentna na vsako krivuljo iz družine v neki točki, unija točk tangentnosti pa je ravno cela ovojnica.

Opomba 5.2. Vsaka krivulja iz družine mora biti diferenciabilna (in zato zvezna), vendar to ni zadosten pogoj, da ovojnica te družine družine obstaja – protiprimer je družina krožnic s skupnim središčem in polmerom, ki se zvezno povečuje [43]. Ovojnica je dana kot rešitev enačb

$$F(t, x, y) = 0 \text{ in } \frac{\partial}{\partial t} F(t, x, y) = 0,$$

kjer je $\partial F / \partial t$ parcialni odvod funkcije F po parametru t .

Opomba 5.3. Ker so pregibi ravni, bodo v našem primeru krivulje v družini kar premice. Te premice so torej ravno tangentne na ovojnico te družine.

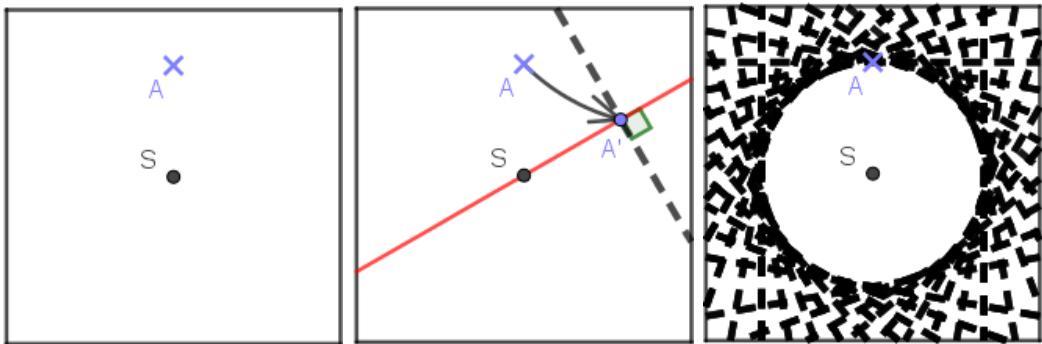
Pa si poglejmo, kako s prepogibi dobimo tangentne na vse štiri stožnice.

5.1 Krožnica

Aktivnost: Vzemi list papirja in svinčnik ter na sredini označi točko S . Nato drugje označi še točko A . Skozi točko S prepogni poljubno premico in na njej označi točko A' , da velja $|SA| = |SA'|$. Nato skozi točko A' prepogni pravokotnico na premico SA' . To je iskan pregib. To ponovi čimvečkrat za različno izbiro premice skozi točko S (gl. sliko 58). Kaj opaziš?

Opomba 5.4. V podpoglavlju 2.2.2 smo se naučili prenašati razdalje, zato je zgornja konstrukcija mogoča, zahteva pa še nekaj dodatnih vmesnih pregibov (gl. dokaz trditve 2.11).

Iz konstrukcije pregiba kot pravokotnice na premico SA' skozi točko A' je naslednja trditev očitna in ne potrebuje zapisanega dokaza.



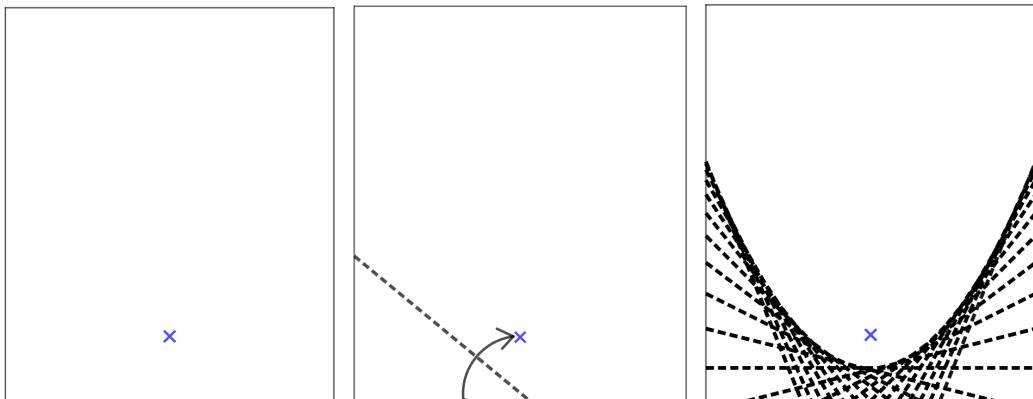
Slika 58: Sukanje izbrane točke okoli središča.

Trditev 5.5. Konstrukcija iz zgornje aktivnosti nam poda pregib, ki je tangenten na krožnico s središčem v točki S in polmerom SA .

Za različno izbiro premic skozi točko S dobimo različne tangente. S ponavljanjem konstrukcije tangent v neskončnost dobimo družino tangent, katere ovojnica je krožnica s središčem v točki S in polmerom SA .

5.2 Parabola

Aktivnost: Vzemi pravokoten list papirja in svinčnik ter nekje sredi spodnje polovice lista s pisalom označi točko. Nato si izberi točko še na spodnji stranici lista in ga prepogni tako, da se obe izbrani točki prekrijeta. To ponovi čimvečkrat za različno izbiro točke na spodnji stranici papirja (gl. sliko 59). Kaj opaziš?



Slika 59: Prepogibanje spodnje stranice papirja na izbrano točko.

Omenjen pregib je origami operacija O3, lahko pa nanjo gledamo tudi kot na operacijo O6. Za le-to smo v poglavju 2 že premislili, da nam pregib, ki poteka skozi dano točko B in točko A položi na premica a , poda tangentu na parabolo z goriščem A in premico vodnico a (gl. sliko 6 in premislek nad njo). Tukaj pa take točke B ni, kar pomeni le to, da smo s pregibom konstruirali neko tangentu – pregib je namreč simetrala daljice, ki ima za krajišči obe izbrani točki iz navodila aktivnosti, torej obstaja enolična točka (točka P na sliki 6), ki je enako oddaljena od spodnje stranice lista in prve izbrane točke. Spodnja trditve je tako že dokazana.

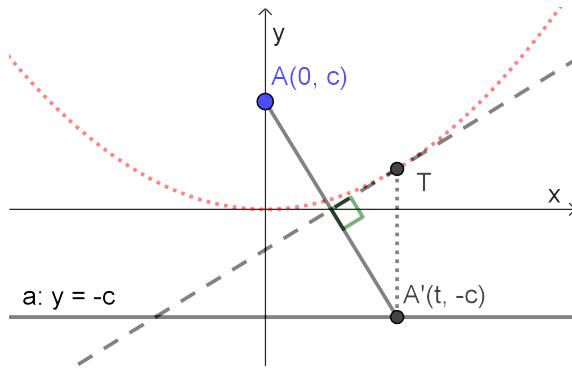
Trditev 5.6. Konstrukcija iz zgornje aktivnosti nam poda pregib, ki je tangenten na parabolo z goriščem v izbrani točki in premico vodnico, ki jo predstavlja spodnja stranica lista.

Ker je vsak pregib tangenten na isto parabolo, je obris, ki bi nastal po neskončno pregibih, res ta parabola.

To je bil intuitiven premislek. Poglejmo si, kako lahko to dokažemo na bolj matematični način.

Parametrizacija pregibov

Začnimo kar s parametrizacijo družine konstruiranih pregibov. V ta namen v model poljubne točke in spodnje stranice lista vpeljimo nekaj oznak. Naj bo $c \in \mathbb{O}$. Vzemimo točko $A(0, c)$ in premico $a : y = -c$, ki sta origami-konstruktibilni, in naredimo pregib, ki točko A preslikava na premico a v točko $A'(t, -c)$ za nek $t \in \mathbb{R}$ (slika 60).



Slika 60: Pregib točke $A(0, c)$ na premico $a : y = -c$.

Ker je pregib oz. konstruirana premica simetrala daljice AA' , lahko hitro določimo njeno enačbo. Koeficient nosilke daljice AA' je $k_A = -\frac{2c}{t}$, središče pa $(\frac{t}{2}, 0)$. Tako hitro določimo enačbo pregiba:

$$y = \frac{t}{2c}x - \frac{t^2}{4c}. \quad (5.1)$$

Dobili smo iskanou parametrizacijo družine pregibov z enačbo

$$F(t, x, y) = \frac{t}{2c}x - y - \frac{t^2}{4c} = 0.$$

Za vsak $t \in \mathbb{R}$ torej dobimo drugo tangento na parabolo z goriščem v točki A in premico vodnico a z zgornjo enačbo 5.1. Izrazimo sedaj enačbo ovojnice preko sistema enačb iz opombe pod definicijo 5.1. Iz enačbe $(\partial/\partial t)F(t, x, y) = 0$ dobimo $x/2c - 0 - 2t/4c = 0$ oz. $t = x$. Ko t vstavimo v enačbo $F(t, x, y) = 0$, dobimo

$$y = \frac{x^2}{4c}, \quad (5.2)$$

torej je ovojnica res parabola.

Drugi dokazi

Njeno enačbo lahko dobimo tudi brez definicije ovojnice. Ker so vse točke na pregibu enako oddaljene od točk A in A' , na pregibu obstaja le ena točka T , za katero velja $d(T, A) = d(T, a)$. Njena abscisa je $x = t$ (točka T leži na pregibu točno nad točko A' , gl. sliko 60) in iz enačbe 5.1, dobimo še ordinato $y = t^2/4c$. Ker točka T za vsak $t \in \mathbb{R}$ leži na paraboli, pri menjavi $x = t$ dobimo ravno enačbo 5.2.

Hull v [21, str. 55–56] poda prefijen dokaz preko kvadratne formule. Vemo, da pregib O6 ne obstaja vedno (slika 5 desno). Poglejmo, ali obstajajo v ravnini našega modela kakšne točke, skozi katere ne moremo konstruirati pregiba oz. tangente. Vzemimo našo parametrizacijo družine tangent (enačba 5.1) in jo rešimo za t . Dobljena formula nam pove, za katere vrednosti t pregib poteka skozi točko (x, y) :

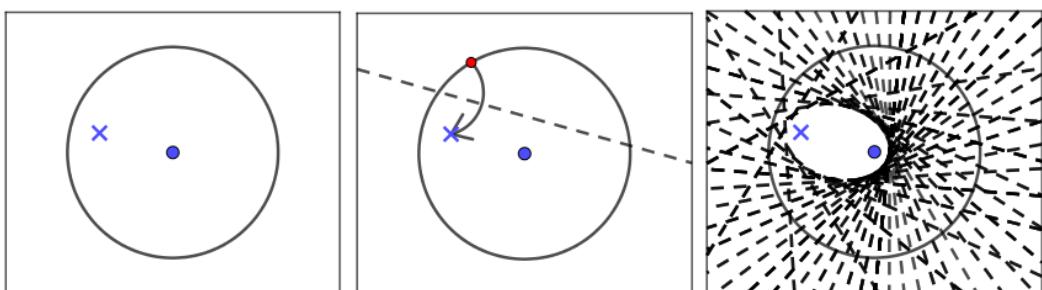
$$\frac{1}{4c}t^2 - \frac{x}{2c}t + y = 0 \Rightarrow t_{1,2} = \frac{\frac{x}{2c} \pm \sqrt{\frac{x^2}{4c^2} - \frac{y}{c}}}{\frac{1}{2c}}.$$

Enačba ima dve realni rešitvi pri pogoju $x^2/4c^2 - y/c > 0$ oziroma $y < x^2/4c$, kar pomeni, da vsako točko (x, y) , za katero ta pogoj velja, sekata dva pregiba. To so ravno točke pod parabolom $y = x^2/4c$. Za točke na paraboli velja $y = x^2/4c$, iz česar dobimo eno rešitev $t = x$, torej to točko seka natanko en pregib. Nazadnje nam ostane še območje, za katerega velja $y > x^2/4c$, t. j. območje nad parabolom $y = x^2/4c$, kar nam ne poda realnih rešitev za t , torej ga ne seka noben izmed konstruiranih pregibov. Tako je obris, ki ga dobimo v nalogi, res parabola $y = x^2/4c$.

Aktivnosti za naslednji dve podpoglavlji sta enaki kot v tem, le da namesto spodnje stranice lista v izbrano točko prepogibamo krožnico.

5.3 Elipsa

Aktivnost: Vzemi list papirja in svinčnik ter na sredini nariši poljubno krožnico. Označi njeno središče. Na notranji strani krožnice si izberi poljubno točko. Izberi si točko na krožnici in list prepogni tako, da se obe izbrani točki prekrijeta. To ponovi čimvečkrat za različno izbiro točke na krožnici (gl. sliko 61). Kaj opaziš?



Slika 61: Prepogibanje krožnice na izbrano točko znotraj nje.

Opomba 5.7. Za izris poljubne krožnice tu lahko uporabimo šestilo. Prej smo videli, da znamo lomljeno krožnico prepogniti tudi z origamijem, vendar imamo potem na listu papirja veliko pregibov, ki nam ovirajo pogled na ciljno sliko. Zato je uporaba šestila v ta namen dovoljena predvsem iz praktičnega vidika.

Izgleda, kot da se nam izriše elipsa, ki ima za gorišči središče krožnice in izbrano točko znotraj nje. Spomnimo se, da na elipsi ležijo vse točke, katerih vsota razdalj do obeh gorišč je konstantna in enaka dolžini velike osi (t. j. dvakratnik velike polosi). V našem primeru je elipsa natančno določena, kar nam pove naslednja trditev [21, str. 60–61].

Trditev 5.8. *Konstrukcija iz zgornje aktivnosti nam poda pregib, ki je tangenten na elipso z goriščema v obeh izbranih točkah in veliko osjo, enako polmeru izbrane krožnice.*

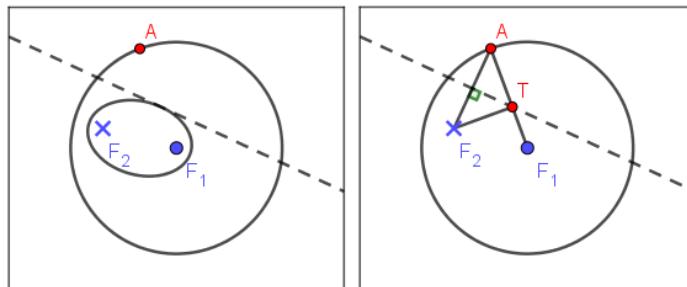
Dokaz. Naj bo točka F_1 središče krožnice s polmerom r in točka F_2 poljubna točka znotraj krožnice. Potem je elipsa, ki ima ti dve točki za svoji gorišči in veliko os enako r , natančno določena. Po navodilih iz aktivnosti konstruiramo en pregib, pri čemer na krožnici izberemo poljubno točko A (slika 62 levo). Dokazujemo, da je tangenten na to elipso.

Označimo s T presečišče⁹ pregiba in daljice AF_1 (slika 62 desno). Ker je pregib simetrala daljice AF_2 , velja $|TA| = |TF_2|$, torej je

$$|TF_1| + |TF_2| = |TF_1| + |TA| = |F_1A| = r$$

za vsako izbiro točke A . Ker je r velika os elipse, točka T leži na njej.

Pokažimo še, da je pregib tangenten na elipso. Opazimo, da so vsi trije koti z vrhom v točki T , ki imajo za enega od krakov pregiba, skladni. Značilnost tangent na elipso pa je ravno ta, da se žarek, ki ga izstrelimo iz enega gorišča v rob elipse, vedno pod istim kotom odbije v drugo gorišče.



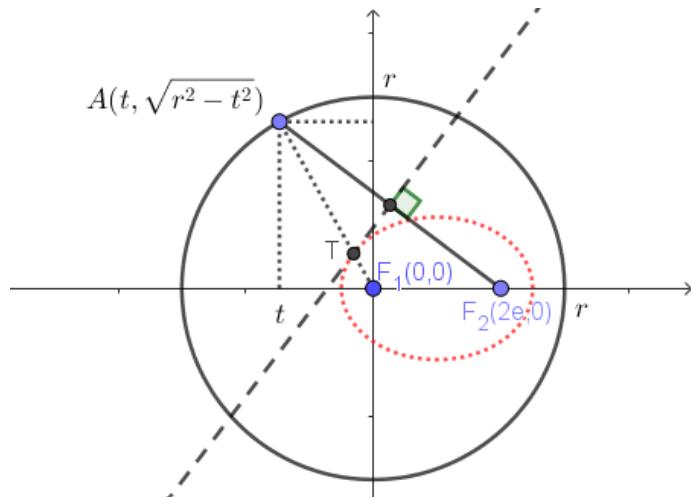
Slika 62: Dokaz tangentnosti pregibov na elipso.

Torej je pregib tangenten na dano elipso v točki T . □

Parametrizacija pregibov

Poščimo še parametrizacijo teh pregibov in izračunajmo enačbo njihove ovojnice – želimo si dobiti enačbo elipse. Naj bo točka $F_1 = (0, 0)$ središče krožnice z danim polmerom r in $F_2 = (2e, 0)$ neka točka znotraj krožnice za nek $0 < 2e < r$ (slika 63). Brez škode za splošnost naj bo A točka na zgornjem loku krožnice, torej $A = (t, \sqrt{r^2 - t^2})$ za nek $t \in [-r, r]$.

⁹Presečišče vedno obstaja, saj bi v primeru, da bi točki A in F_1 ležali na isti strani prepogiba, veljalo $|AF_1| \geq |F_2F_1|$ oziroma da točka F_2 leži na ali zunaj krožnice (kar po predpostavki ne drži).



Slika 63: Parametrizacija pregiba točke A na točko F_2 .

Z daljico povežemo točki A in F_2 in določimo njen središče v točki $((2e + t)/2, \sqrt{r^2 - t^2}/2)$, koeficient njene nosilke pa je $-\sqrt{r^2 - t^2}/(2e - t)$. Enačba pregiba je tako

$$y = \frac{2e - t}{\sqrt{r^2 - t^2}}x - \frac{(4e^2 - t^2)}{2\sqrt{r^2 - t^2}} + \frac{\sqrt{r^2 - t^2}}{2}.$$

Iskana parametrizacija družine pregibov ima zato enačbo

$$F(t, x, y) = \frac{2e - t}{\sqrt{r^2 - t^2}}x - y - \frac{(4e^2 - t^2)}{2\sqrt{r^2 - t^2}} + \frac{\sqrt{r^2 - t^2}}{2} = 0. \quad (5.3)$$

Iz enačbe $(\partial/\partial t)F(t, x, y) = 0$ dobimo¹⁰ $t = 2r^2x/(r^2 + 4ex - 4e^2)$. (To sem dala v Wolfram, a je potrebno priflikat kakšen screenshot za dokaz, da mi bojo verjeli?) To vstavimo v enačbo $F(t, x, y) = 0$ in po nekaj dela res dobimo

$$\frac{(x - e)^2}{\frac{r^2}{4}} + \frac{y^2}{\frac{r^2 - 4e^2}{4}} = 1,$$

kar ustreza začetni izbiri točk F_1 in F_2 ter polmera r .

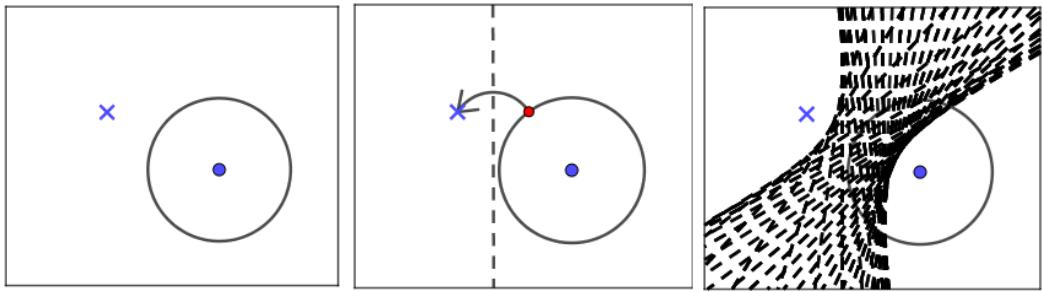
Kaj se zgodi, če točko izberemo zunaj krožnice, pa si pogledamo v naslednjem razdelku.

5.4 Hiperbola

Aktivnost: Vzemi list papirja in svinčnik ter na sredini nariši poljubno krožnico. Označi njen središče. Na zunanj strani krožnice si izberi poljubno točko. Izberi si točko na krožnici in list prepogni tako, da se obe izbrani točki prekriveta. To ponovi čimvečkrat za različno izbiro točke na krožnici (gl. sliko 64). Kaj opaziš?

Podobno kot prej lahko sklepamo, da se nam izriše obris hiperbole. Spomnimo se, da na hiperboli ležijo vse točke, katerih absolutna vrednost razlike razdalj do

¹⁰Za računanje in poenostavitev izrazov priporočamo uporabo kalkulatorja npr. Wolfram Mathematica.



Slika 64: Prepogibanje krožnice na izbrano točko zunaj nje.

obeh gorišč je konstantna in enaka dolžini velike osi. Tako kot pri elipski je tudi tu hiperbola natančno določena. Naslednja trditev in dokaz sta zato zelo podobna kot za elipso.

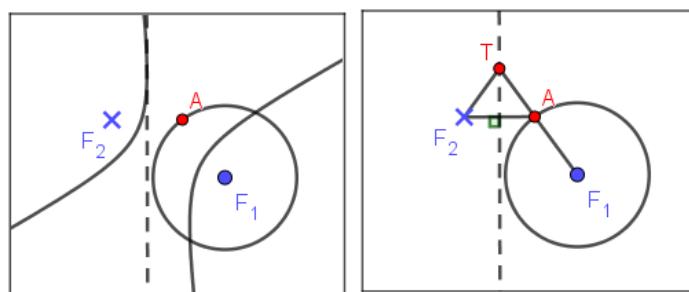
Trditev 5.9. Konstrukcija iz zgornje aktivnosti nam poda pregib, ki je tangenten na hiperbolo z goriščema v obeh izbranih točkah in veliko osjo (t. j. dvakratnik velike polosi), enako polmeru izbrane krožnice.

Dokaz. Naj bo točka F_1 središče krožnice s polmerom r in točka F_2 poljubna točka zunaj krožnice. Potem je hiperbola, ki ima ti dve točki za svoji gorišči in veliko os enako r , natančno določena. Po navodilih iz aktivnosti konstruiramo en pregib, pri čemer na krožnici izberemo poljubno točko A (slika 65 levo). Dokazujemo, da je tangenten na to hiperbolo.

Označimo s T presečišče¹¹ pregiba in nosilke daljice AF_1 (slika 65 desno). Ker je pregib simetrala daljice AF_2 , velja $|TF_1| = |TF_2|$, torej je

$$||TF_1| - |TF_2|| = ||TF_1| - |TA|| = |F_1A| = r$$

za vsako izbiro točke A . Ker je r velika os hiperbole, točka T leži na njej.



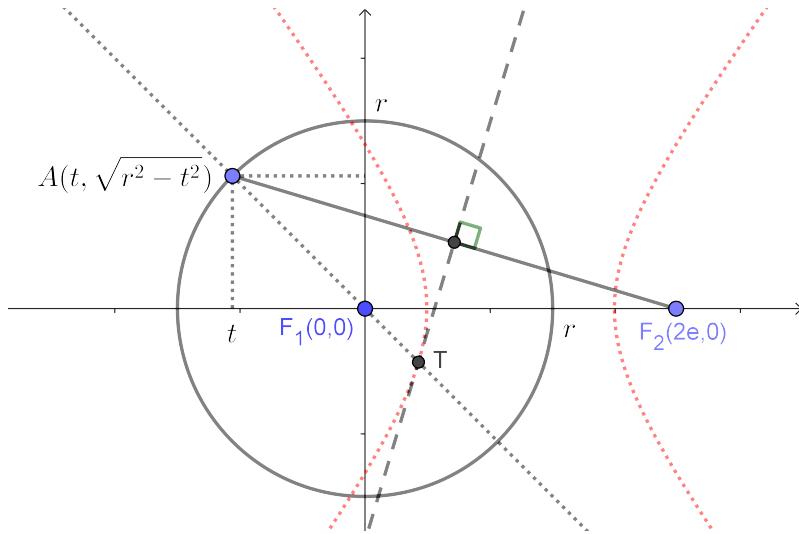
Slika 65: Dokaz tangentnosti pregibov na hiperbolo.

Pokažimo, da je to res tangentna. Ker je pregib simetrala daljice F_2A , prepolavlja kot $\angle ATF_2$, ki je enak kotu $\angle F_1TF_2$. Torej pregib skozi točko T na hiperboli prepolavlja kot, ki ga ta točka oklepa z goriščema, to pa je ravno značilnost tangent na hiperbolo (opomba zase: pokazi, da je to res). Torej je pregib tangenten na dano hiperbolo v točki T . \square

¹¹Presečišče ne obstaja le v dveh primerih, ko je nosilka daljice AF_2 tangentna na krožnico (pregib in nosilka AF_1 sta vzporedni). V tem primeru sta pregiba ravno asymptoti na hiperbolo.

Parametrizacija pregibov

Določimo še parametrizacijo družine pregibov. Postopek je identičen kot pri parametrizaciji tangent na elipso, edina sprememba je le, da tu velja $0 < r < 2e$. Ko v ravnino uvedemo točke, daljice in premice kot zgoraj (slika 66), dobimo enako parametrizacijo družine pregibov (enačba 5.3).



Slika 66: Parametrizacija pregiba točke A na točko F_2 .

Ker velja $r^2 - 4e^2 < 0$, v končni enačbi namesto tega zapišemo $-(-(r^2 - 4e^2))$ in prvi minus postavimo pred y^2 . Tako res dobimo enačbo hiperbole, ki ima enaki osi kot elipsa iz prejšnjega razdelka:

$$\frac{(x - e)^2}{\frac{r^2}{4}} - \frac{y^2}{\frac{4e^2 - r^2}{4}} = 1.$$

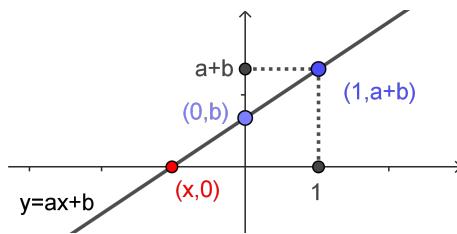
Dokazi v drugih virih

Dokaz z malo drugačnim pritopom, kjer se izračuna splošno enačbo elipse in hiperbole glede na izbrano krožnico in točko znotraj oz. zunaj nje najdemo tudi v [38, str. 204–206]. Poleg tega tudi Lotka v [31] iz opisane konstrukcije na svoj način izpelje splošno enačbo elipse in nastavi popravek, ki nam da splošno enačbo hiperbole. S tem oba vira dokažeta, da je ogrinjača teh pregibov res elipsa oz. hiperbola.

6 Reševanje enačb

V tem poglavju s prepogibanjem papirja rešujemo enačbe z racionalnimi koeficienti. Njihove rešitve bomo konstruirali v evklidski ravnini, ki jo predstavlja list papirja. Spomnimo se, da smo origami števila definirali kot vsa števila, ki jih lahko s prepogibanjem konstruiramo preko na začetku danega izhodišča O in števila 1 na realni osi (definicija 2.26), evklidska ravnina pa je v bijekciji s kompleksno ravnino, dano v definiciji. Zaradi večje preglednosti bomo lahko pomožne pregibe in točke (ki bi jih sicer znali konstruirati z origamijem, npr. zrcaljene točke) narisali kar z ravnilom in in pisalom.

Začnimo z najbolj osnovno, tj. linearno enačbo. Enačba $ax + b = 0$, kjer $a, b \in \mathbb{Q}$ in $a \neq 0$ ima rešitev $x = -b/a$, ki je racionalno število, torej origami število in samo po sebi konstruktibilno. Če bi želeli rešitev konstruirati geometrijsko preko pregibov, v ravnini prepognemo premico $y = ax + b$ (napravimo pregib npr. skozi točki $(0, b)$ in $(1, a+b)$) in njeno presečišče z abscisno osjo nam da iskano rešitev (slika 67).



Slika 67: Reševanje linearne enačbe $ax + b = 0$. Abscisa rdeče točke je iskana rešitev.

Uporaba origamija je za reševanje linearne enačbe očitno manj praktična kot računanje rešitve. Bolj zanimivo je reševanje kvadratne in kubične enačbe. Ker za njune rešitve obstajata splošni formuli, bi lahko rešitve najprej izračunali in jih nato preko operacij seštevanja, odštevanja, množenja, deljenja in korenjenja konstruirali s prepogibanjem, vendar je to časovno preveč potratno. Pogledali si bomo, kako se z origamijem lahko temu izognemo in rešitev konstruiramo brez uporabe računskih operacij.

Ključno vlogo bosta v nadaljevanju odigrali origami operaciji O6 in O7. Prva nam hkrati s konstrukcijo tangente na parabolo določi tudi točko na paraboli, skozi katero je pregib tangenten na stožnico, to pa je ekvivalentno reševanju kvadratne enačbe. Druga s konstrukcijo skupne tangente na dve paraboli omogoča reševanje kubične enačbe – to pokaže npr. Alperin v [1, str. 129], ko izpelje koeficient skupne tangente na dani paraboli, za katerega se izkaže, da je rešitev kubične enačbe (gl. razdelek 6.3). Število skupnih tangent je torej enako številu rešitev kubične enačbe, kar pomeni, da imata paraboli v evklidski ravnini največ tri skupne tangente.

V teoriji bi nam prepogibanje papirja pomagalo tudi pri reševanju kvartičnih enačb, saj zanje še obstaja splošna formula (vendar zaradi dolžine praktično neuporabna) in tudi vemo, da lahko enačbo četrte stopnje prevedemo na enačbe nižje stopnje (gl. [7], [44] ali konec dokaza izreka 9.8 v [32, str. 134]). Geometrično pa je to reševanje potem težje izvedljivo in zato manj motivacijsko, saj bi postopek reševanja sistema dveh enačb zahteval veliko več pregibov kot pri reševanju le ene kubične ali kvadratne enačbe, pa tudi vmesne rezultate bi morali računati. Tako bi se lahko tu

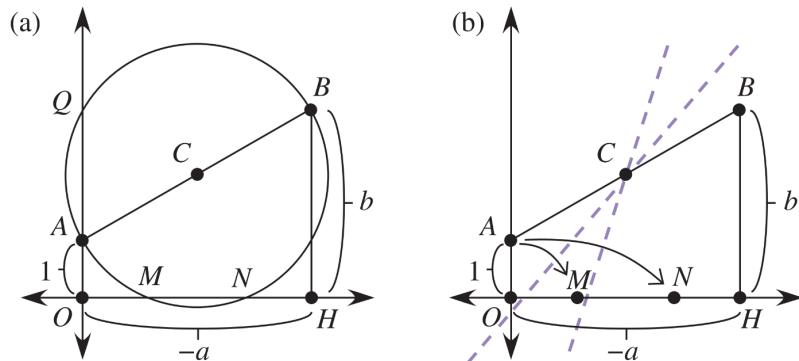
z reševanjem enačb preko origamija ustavili, vendar obstajajo alternativne rešitve. Na koncu poglavja bomo povzeli postopek iz [6], ki preko iskanja skupnih tangent na določeni stožnici v projektivni ravnini reši splošno kubično in nato, sicer pod določenimi pogoji, tudi kvartično enačbo.

Za enačbe pete in višjih stopenj pa splošna formula za rešitve ne obstaja več (to vemo po *Abel-Ruffinijev* izreku, gl. [34]). Kljub temu se da z origamijem še vedno konstruirati rešitve nekaterih enačb višjih stopenj, vendar ne z enkratnimi prepogibmi – potrebno se je poslužiti dvojnih (*two-fold*) ali večkratnih (*multi-fold*) prepogibov, s katerimi pa se v tej nalogi ne ukvarjam.

Reševanje enačb s prevedbo ekvivalentnih konstrukcij

Z evklidskim orodjem lahko rešujemo enačbe druge stopnje, saj znamo konstruirati kvadratni koren poljubnega origami-konstruktibilnega števila. Ker vemo, da lahko s prepogibanjem papirja konstruiramo vse (in še več), kar se da z evklidskim orodjem, je včasih lažje za rešitev nekega problema najti (bolj domačo) evklidsko konstrukcijo, ki jo lahko nato preko origami operacij preobrazimo v origami konstrukcijo.

Kot primer tega Hull v [20, str. 38] navaja Lillovo konstrukcijo rešitve kvadratne enačbe preko krožnice – na sliki 68 levo je prikaz evklidske konstrukcije, desno pa prevedba na origami konstrukcijo. Lahek dokaz, zakaj deluje, je prepuščen bralcu.



Slika 68: Reševanje enačbe $x^2 + ax + b = 0$. Vzeto iz [20, str. 38].

6.1 Reševanje kvadratne enačbe preko tangente na parabolu

Rešujemo enačbo oblike

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

kjer so $a, b, c \in \mathbb{Q}$ in velja $a \neq 0$. Njeni splošni rešitvi sta

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Postopek, ki si ga bomo pogledali v nadaljevanju, predpostavlja $a = 1$. Ker je vodilni koeficient neničeln, lahko z njim enačbo delimo in pri tem še vedno dobimo racionalne koeficiente, zato lahko predpostavko brez škode za splošnost sprejmemo. Nova oblika enačbe je tako

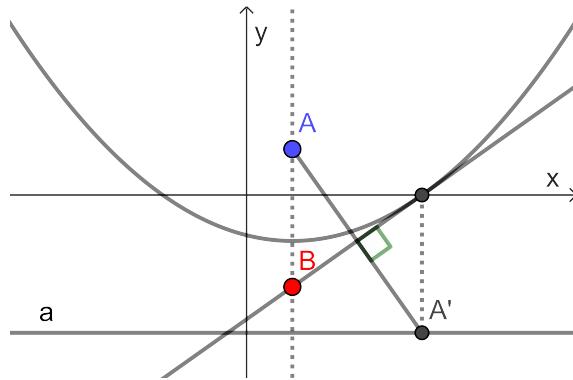
$$x^2 + bx + c = 0. \quad (6.1)$$

Predpostavimo, da ima enačba dve različni realni rešitvi oz. da je diskriminanta enačbe pozitivna, tj. $D = b^2 - 4c > 0$. Če realnih ničel ni, o origami konstrukciji rešitev namreč nima smisla razpravljati. Če je rešitev ena, je podana kot $x = -b/2$, kar je origami-konstruktibilno število in se ga lahko takoj konstruira.

Enačba 6.1 nam ob teh predpostavkah torej poda pokončno parabolo $y = x^2 + bx + c$ z vodoravno premico vodnico in dvema ničlama, ki sta rešitvi naše enačbe. Iščemo abscisi presečišč parabole z abscisno osjo.

Zopet se bomo poslužili dosedanjega znanja o operaciji O6. Ta nam s pregibom skozi dano točko B , ki točko A položi na premico a , konstruira tangento na parabolo z goriščem v točki A in premico vodnico a .

Naša parabola je z enačbo seveda natančno določena. Ideja iskane konstrukcije rešitev enačbe je določiti tako točko B (najlažje kar na osi parabole), da bi nam izvedba operacije O6 podala tangento na parabolo ravno v njeni ničli. Želeni pregib mora potekati skozi točko B in gorišče A položiti na tisto točko A' na premici vodnici a , ki ima enako absciso kot ničla parabole. (gl. slika 69). Taka točka B je z osjo parabole in katerokoli izmed ničlama (zaradi simetrije) natanko določena.



Slika 69: Operacijo O6 skozi iskano točko B poda rešitev kvadratne enačbe.

Edina nevarnost, da ta konstrukcija ne bo delovala, je možnost, da točka B kdaj ne bo origami-konstruktibilna točka. Zato sedaj izračunajmo njene koordinate in se prepričajmo, da se to nikoli ne bo zgodilo.

Najprej iz dane enačbe parabole določimo njen gorišč A in premico vodnico a . Spomnimo se, da iz enačbe oblike

$$(x - x_0)^2 = 2p(y - y_0)$$

razberemo njen teme (x_0, y_0) , gorišče $(x_0, y_0 + p/2)$ in enačbo premice vodnice $y = y_0 - p/2$. V našem primeru enačbo $y = x^2 + bx + c$ preoblikujemo v

$$\left(x - \left(-\frac{b}{2}\right)\right)^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \left(y - \left(c - \frac{b^2}{4}\right)\right).$$

S tem sta gorišče A in premica vodnica a določena:

$$A\left(-\frac{b}{2}, c - \frac{b^2}{4} + \frac{1}{4}\right) \text{ in } a : y = c - \frac{b^2}{4} - \frac{1}{4}.$$

Naj bo t ena izmed rešitev enačbe 6.1. Na premici a z A' označimo točko z absciso t . Poiščimo enačbo pregiba, ki gorišče A položi v točko A' . Ta pregib bo tangenten na parabolo ravno v njeni ničli, njegovo presečišče z osjo parabole $x = -b/2$ pa nam bo določilo točko B .

Koeficient nosilke daljice AA' je $-1/(2t+b)$, torej je koeficient pregiba $k = 2t+b$. Pregib je po konstrukciji tangenten na parabolo v ničli $(t, 0)$, torej je njegova enačba

$$y = (2t+b)(x-t) = (2t+b)x - 2t^2 - bt = (2t+b)x - t^2 + c.$$

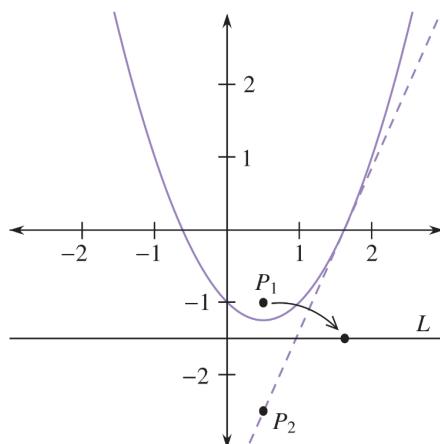
Pri tem smo upoštevali, da velja $t^2 + bt + c = 0$. Presečišče pregiba in osi parabole je tako točka B z absciso $x = -b/2$ in ordinato

$$y = (2t+b)\left(-\frac{b}{2}\right) - t^2 + c = -t^2 - tb + c - \frac{b^2}{2} = c + c - \frac{b^2}{2} = 2c - \frac{b^2}{2}.$$

Obe koordinati sta racionalni, torej je točka B konstruktibilna točka. Ker leži na osi parabole, nam poda obe rešitvi enačbe – pregiba sta si simetrična glede na os. Povzemimo sedaj postopek konstrukcije rešitve kvadratne enačbe 6.1 z diskriminanto $D = b^2 - 4c$:

1. V koordinatnem sistemu označimo gorišče $A\left(-\frac{b}{2}, \frac{1-D}{4}\right)$, premico vodnico $a : y = -\frac{1+D}{4}$ in točko $B\left(-\frac{b}{2}, -\frac{D}{2}\right)$.
2. Z operacijo O6 naredimo pregib skozi točko B , ki točko A položi na premico a (če je diskriminanta enačbe pozitivna, sta možna pregiba dva).
3. Skozi sliko točke A naredimo vertikalnen pregib in abscisa njegovega presečišča z abscisno osjo je ničla dane enačbe.

Primer: Poiččimo rešitve enačbe $x^2 - x - 1 = 0$. Določimo obe točki in premico: $A(\frac{1}{2}, -1)$, $B(\frac{1}{2}, -\frac{5}{2})$ in $a : y = -\frac{3}{2}$ (na sliki 70 so zaporedoma uporabljene oznake P_1 , P_2 in L). Opravimo operacijo O6 in označimo presečišče abscisne osi in pravokotnice nanjo skozi sliko točke A . Če smo bili pri pregibanju natančni, dobimo presečišči pri $x_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$.



Slika 70: Konstrukcija rešitve enačbe $x^2 - x - 1 = 0$. Vzeto iz [20, str. 37].

Metoda je enostavna, vendar v resnici zopet ne najbolj praktično izvedljiva, saj so lahko točki A in B ter premica a težje origami-konstruktibilni. V naslednjem poglavju bomo med drugim spoznali Lillovo metodo, preko katere bomo z operacijo O6 do rešitve prišli hitreje in enostavneje (gl. razdelek 6.2.3).

6.2 Belochin postopek z Lillovo metodo

Vzemimo enačbo oblike

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0,$$

kjer so $a, b, c, d \in \mathbb{Q}$ in velja $a \neq 0$. Tu je navedena ena oblika zapisa njene splošne rešitve:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3} \\ C &= \sqrt[3]{\frac{1}{2}(Q + 2b^3 - 9abc + 27a^2d)} \\ x_1 &= -\frac{b}{3a} - \frac{C}{3a} - \frac{b^2 - 3ac}{3aC} \\ x_2 &= -\frac{b}{3a} + \frac{C(1 + i\sqrt{3})}{6a} + \frac{(1 - i\sqrt{3})(b^2 - 3ac)}{6aC} \\ x_3 &= -\frac{b}{3a} + \frac{C(1 - i\sqrt{3})}{6a} + \frac{(1 + i\sqrt{3})(b^2 - 3ac)}{6aC} \end{aligned}$$

Operacija O6 nam je preko konstrukcije tangente na parabolo pomagala rešiti kvadratno enačbo. Spomnimo se, da je Belocheva to v tridesetih letih prejšnjega stoletja nadgradila z operacijo O7, ki nam konstruira skupno tangento na dve paraboli, pregib pa imenujemo *Belochin pregib*. Z njim je kot prva odkrila resnično moč origami konstrukcij, a je žal trajalo več kot pol stoletja, da so matematiki začeli ceniti njeno odkritje. Zgodilo se je celo, da so nekateri neodvisno od nje odkrili ta pregib in iznašli svoje postopke, ne da bi sploh poznali njeno delo.

Seznanili se bomo z Lillovo metodo, s katero lahko v teoriji rešimo enačbo poljubne stopnje. V središču naše pozornosti bo Belochin origami postopek za reševanje kubične enačbe, na koncu pa bomo Lillovo metodo uporabili tudi za reševanje kvadratne enačbe.

6.2.1 Reševanje kubične enačbe z Belochinim postopkom

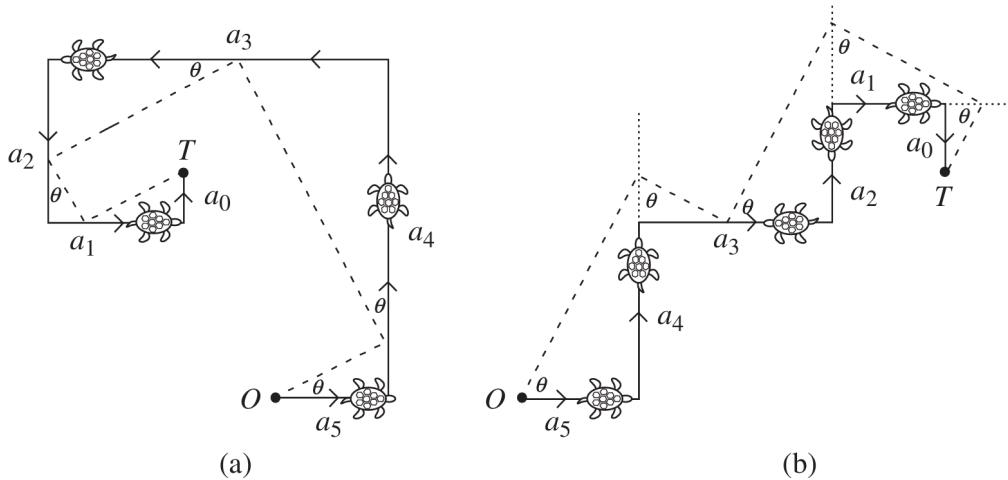
Belocheva je sama odkrila naslednji postopek reševanja kubične enačbe, kjer nam vsak Belochin pregib poda eno izmed rešitev. Število teh pregibov pa je, kot smo premislili že v uvodu poglavja, enako številu rešitev dane enačbe. Postopek temelji na Lillovi genialni metodi iskanja ničel poljubnih polinomov z realnimi koeficienti, ki si jo bomo v naslednjem razdelku podrobneje pogledali, avtorica pa je zaslužna za to, da se jo zelo enostavno konstruira tudi v praksi.

Lillova metoda

Avstrijski inženir Eduard Lill je l. 1867 v svojem članku [30] opisal inovativen postopek, ki je v svoji osnovi čisto enostaven. Imejmo poljuben polinom $p(x) =$

$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ z realnimi koeficienti in iščemo njegove realne ničle, če obstajajo. Lill je iz njegovih koeficientov v ravnini ustvaril enolično pot.

Običajno pri opisovanju poteka konstrukcije uporabljamo figuro želve, katere pot nas zanima. Želva nam v vsakem trenutku kaže, kam je usmerjena in v katero smer se premika. Na začetku jo postavimo v koordinatno izhodišče O tako, da gleda v pozitivno smer x -osi. Želva najprej v to smer prehodi razdaljo, enako koeficientu a_n . Nato se obrne za 90° v pozitivno smer (nasprotno smer urinega kazalca) in prehodi naslednjo razdaljo a_{n-1} . To ponovi za vsak koeficient polinoma in po prehodeni razdalji a_0 se ustavi v neki točki T (slika 71). Če je kateri od koeficientov negativen, želva hodi ritensko (primer (b) na sliki 71 za koeficiente a_3, a_2 in a_0), v primeru ničelnega koeficiente pa obstoji na mestu in se samo obrne. S potjo želve dobimo lomljeno črto iz največ $n+1$ daljic, ki jih brez škode označujmo kar z njihovimi "pripadajočimi" koeficienti.



Slika 71: Primera želvine poti za polinoma pete stopnje. Vzeto iz [22, str. 311].

Sedaj se v izhodišče O postavimo še mi in z laserskim žarkom poskusimo zadeti želvo v točki T tako, da žarek najprej usmerimo daljico a_{n-1} , od katere se odbije v daljico a_{n-2} , od te v daljico a_{n-3} in tako naprej (slika 71). Pri tem upoštevamo dvoje:

- laserski žarek ne upošteva odbojnega zakona in se od daljice vedno odbije pod kotom 90° , zato so vpadni koti žarka na vse daljice med seboj enaki in prav tako to velja za odbojne kote;
- žarek se zato lahko odbije za kot $\pm 90^\circ$. Če zadene daljice, se odbije na isto stran, od koder je prišel, če pa zadene nosilko daljice, se odbije na njeno drugo stran. Samo tako lahko žarek zadene naslednjo daljico oz. njeno nosilko.

Taka pot žarka vedno obstaja in je enolična. Vpadni kot, ki ga v točki O oklepata laserski žarek in abscisna os, označimo z θ .

Trditev 6.1. $\text{Število } x_\theta = -\tan \theta \text{ je ničla polinoma } p(x)$.

Dokaz. Vzemimo primer, ko so vsi koeficienti polinoma $p(x)$ pozitivni. Želvina pot je v tem primeru sestavljena iz $n + 1$ daljic, pot laserskega žarka – ki se vedno odbije od daljice in ne njene nosilke – pa iz n daljic. Slednje so ravno hipotenuze pravokotnih trikotnikov, ki so si med seboj vsi podobni. Za vsak $i \in \{n, \dots, 1\}$ v trikotniku s kateto, ki je del daljice a_i , označimo z y_i kotu θ nasprotno kateto. Dobimo

$$\begin{aligned} y_n &= \tan \theta \cdot a_n = -x_\theta a_n \\ y_{n-1} &= \tan \theta \cdot (a_{n-1} - y_n) = -x_\theta (a_{n-1} + x_\theta a_n) = -(a_{n-1} x_\theta + a_n x_\theta^2) \\ y_{n-2} &= \tan \theta \cdot (a_{n-2} - y_{n-1}) = -x_\theta (a_{n-2} + a_{n-1} x_\theta + a_n x_\theta^2) = \\ &\quad = -(a_{n-2} x_\theta + a_{n-1} x_\theta^2 + a_n x_\theta^3) \\ &\quad \vdots \\ y_1 &= -(a_1 x_\theta + a_2 x_\theta^2 + \dots + a_{n-1} x_\theta^{n-1} + a_n x_\theta^n). \end{aligned}$$

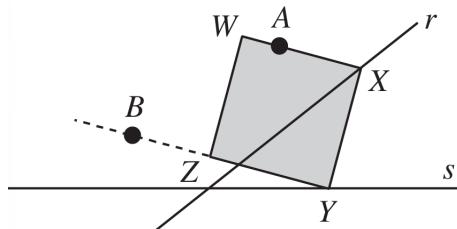
V zadnji enakosti desno stran premaknimo na levo in upoštevamo $y_1 = a_0$. Dobimo ravno $p(x_\theta) = 0$, torej je $x_\theta = -\tan \theta$ res ničla tega polinoma.

Dokaz za primer negativnih ali ničelnih koeficientov sta prepuščena za vajo. Potrebna je le majhna prilagoditev (več v [46, str. 36]). □

Če pod nobenim kotom θ ne moremo zadeti želve, je polinom $p(x)$ brez realnih ničel. Zato je na mestu vprašanje, kako določiti kot θ . Za polinom tretje stopnje je Belocheva preko svojega pregiba našla zelo preprosto rešitev, ki si jo bomo sedaj pogledali.

Belochin kvadrat

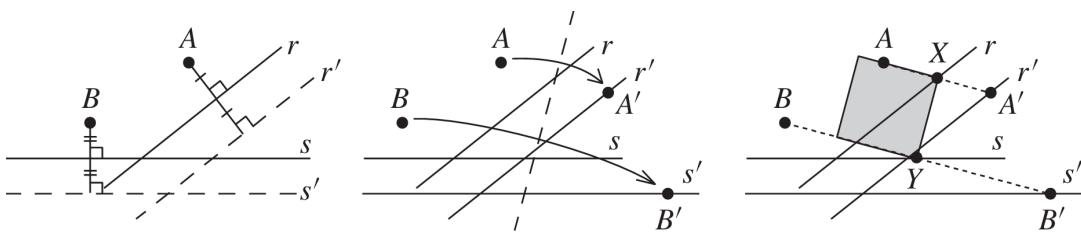
Imejmo dani točki A in B ter premici r in s . Z origamijem konstruirajmo kvadrat $WXYZ$, kjer oglišče X leži na premici r , njegovo sosednje oglišče Y pa na premici s . Velja še, da točka A leži na stranici WX (ali njeni nosilki), točka B pa na stranici ZY (ali njeni nosilki). Kvadrat po avtorici njegove konstrukcije imenujemo *Belochin kvadrat* (slika 72).



Slika 72: Belochin kvadrat. Vzeto iz [22, str. 309].

Opomba 6.2. V resnici nam v Belochinem postopku ne bo koristila konstrukcija samega kvadrata, pač pa bo dovolj le poiskati točki X in Y . Skozinju bo namreč potekala želvina pot od točke A do točke B , ki je po konstrukciji res sestavljena iz treh med seboj pravokotnih daljic. Belocheva pri postopku za konstrukcijo kvadrata navaja naslednje korake:

1. Najprej konstruiramo premico r' , ki je vzporedna premici r in od nje enako oddaljena kot točka A , tako da premica r leži med točko A in premico r' . Na enak način premici s konstruiramo njeno vzporednico s' (slika 73 levo).
2. Opravimo Belochin pregib, ki točko A slika v točko A' na premici r' , točko B pa v točko B' na premici s' (slika 73 na sredi).
3. Naj bo točka X središče daljice AA' in točka Y središče daljice BB' . Po konstrukciji novi točki sovpadata s presečščem pregiba in premice r oz. s . (slika 73 desno). Daljica XY je pravokotna na daljici AX in BY , zato samo še določimo točki W in Z na daljicah ali njunih nosilkah in tako dobimo Belochin kvadrat.



Slika 73: Konstrukcija Belochinega kvadrata z origamijem. Vzeto iz [22, str. 310].

Konstrukcija $\sqrt[3]{2}$ z Belochinim kvadratom

Preden ravno naučeno znanje uporabimo za reševanje kubičnih enačb, si še na hitro poglejmo, kako lahko tudi z Belochinim kvadratom rešimo starogrški problem podvojitve kocke.

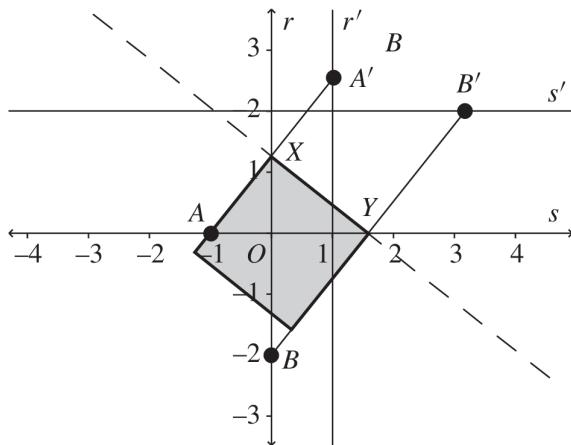
Za premico r vzemimo ordinatno os, za premico s pa abscisno os. Določimo še $A = (-1, 0)$ in $B = (0, -2)$. Vzporednici sta torej $r' : x = 1$ in $s' : y = 2$. Belochin pregib seka premico r v točki X , premico s pa v točki Y (slika 74). Z O označimo koordinatno izhodišče in opazimo podobne pravokotne trikotnike OAX , OXY in OYB . Z upoštevanjem $|AO| = 1$ in $|OB| = 2$ dobimo sledeča razmerja:

$$\frac{|OX|}{|AO|} = \frac{|OY|}{|OX|} = \frac{|OB|}{|OY|} \implies |OX| = \frac{|OY|}{|OX|} = \frac{2}{|OY|},$$

iz česar sledi

$$|OX|^3 = |OX| \cdot \frac{|OY|}{|OX|} \cdot \frac{2}{|OY|} = 2 \implies |OX| = \sqrt[3]{2}.$$

Vidimo lahko, da je to enaka konstrukcija, kot jo je 50 let kasneje neodvisno od Belocheve odkril G. Martin (gl. razdelek 4.1), le da je za točko B vzel točko $(0, -k)$ in s tem konstruiral dolžino $\sqrt[3]{k}$ za poljubno origami število k .



Slika 74: Konstrukcija $\sqrt[3]{2}$ preko Belochinega kvadrata. Vzeto iz [22, str. 310].

Združitev Lillove metode in Belochinega kvadrata v Belochin postopek

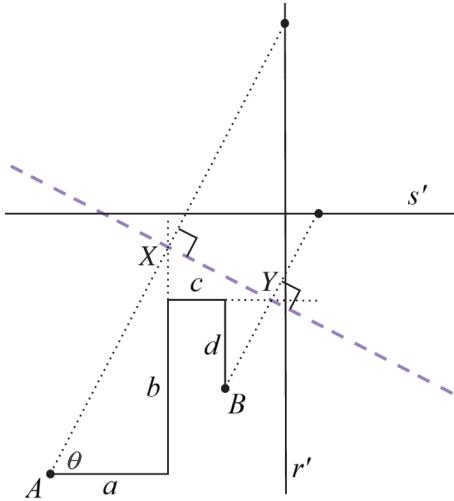
Za poljubno enačbo $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$ povežimo sedaj Lillovo metodo s konstrukcijo primerenega Belochinega kvadrata, ki nam bo natančno določil kot θ . Belochin postopek, ki je opisan v nadaljevanju, velja za vsako izbiro koeficientov enačbe (gl. tudi sliko 75):

1. Za točko A vzemimo izhodišče O . Začrtamo želvino pot za polinom $p(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$, ki se začne v točki A in konča v točki B .
2. Premica r naj bo nosilka daljice b ($r : x = a$), premica s pa nosilka daljice c ($s : y = b$).
3. Določimo premici $r' : x = 2a$ in $s' : y = b + d$ ter opravimo Belochin pregib, ki točko A položi na premico r' in točko B na premico s' .
4. Presečišči pregiba s premicama r in s zaporedoma označimo s točkama X in Y .
5. Zarišemo daljice AX , XY in YB .

Ker po konstrukciji velja $AX \perp XY \perp YB$, je to iskana pot laserskega žarka, ki se odbija pod pravim kotom in zadene želvo. Kot θ je kot, ki ga oklepata daljici a in AX . Rešitev je torej $x_\theta = -\tan \theta$.

Opomba 6.3. Za vsako različno realno rešitev je treba poiskati drug kot. Ker na vemo, koliko realnih rešitev ima enačba, je treba biti pri iskanju Belochinovih pregibov natančen, da ne katerega spregledamo.

Kot zanimivost Lavričeva v [29, str. 10–13] s postopkom, ki je malo preurejen Belochin postopek, še analitično pokaže, da je ob primerno izbranih točkah A in B ter premicah r in s koeficient premice, ki jo predstavlja Belochin pregib, rešitev kubične enačbe. Točki in premici izbere tako, da sta točki X in Y ravno presečišči z ordinatnima osema, iz česar lahko takoj razberemo koeficient premice. V dokazu izpelje enačbi pripadajočih parabol in splošno enačbo njunih tangent ter iz tega dokaže rečeno. To je lahko odlična vaja za dijake, ki si želijo dodatnega izziva.



Slika 75: Belochin postopek za reševanje enačbe $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$. Preurejeno iz [20, str. 42].

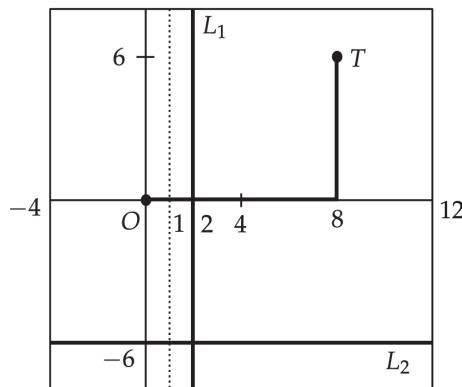
Primer reševanja kubične enačbe z Belochinim postopkom

Več primerov uporabe Belochinega postopka za reševanje kubičnih enačb je opisanih v [46, str. 38–44], tu pa si poglejmo, kako rešimo enačbo, ki ima tako pozitivne kot tudi negativne in ničelne koeficiente. Hull v [21, str. 90–92] obravnava enačbo

$$x^3 - 7x - 6 = 0.$$

Po Lillovi metodi za točko A vzamemo izhodišče O in začrtamo želvino pot. Najprej gremo za 1 v desno ($a = 1$), se obrnemo za 90° v pozitivno smer in obstojimo na mestu ($b = 0$), se zopet obrnemo 90° v pozitivno smer in se premaknemo za 7 v nasprotno smer, torej zopet v desno ($c = -7$), na koncu pa se po ponovnem obratu za 90° v pozitivno smer premaknemo za 6 navzgor ($d = -6$). Končamo v točki $T = (8, 6)$.

Označimo še premice $r : x = a = 1$, $r' : x = 2a = 2$ (na sliki 76 označena z L_1), $s : y = b = 0$ in $s' : y = b + d = -6$ (na sliki 76 označena z L_2).

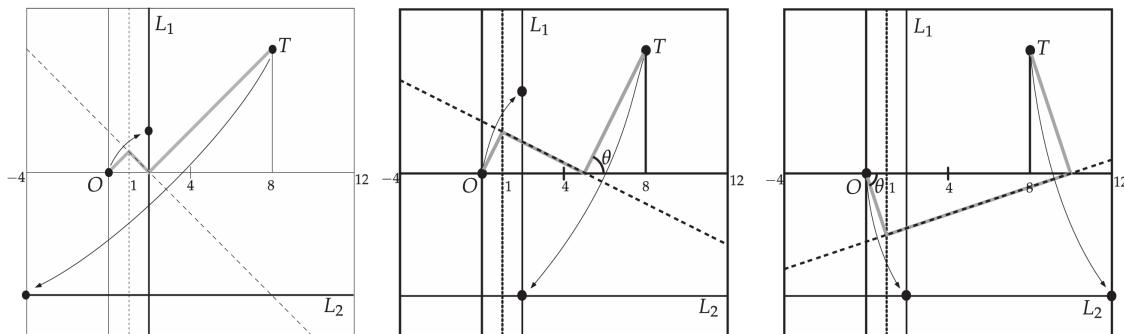


Slika 76: Priprava želvine poti in premic za reševanje enačbe z Lillovo metodo. Vzeto iz [21, str. 87].

Želvina pot je sedaj pripravljena, da točko O prepognemo na premico L_1 in hkrati točko T na premico L_2 . Presečišči pregiba s premicama r in s nam data točki, kjer se laserski žarek za pravi kot odbije in na koncu zadane točko T . Kot, ki ga oklepa žarek z x -osjo ob koordinatnem izhodišču, nam podaja rešitev enačbe.

Na sliki 77 so konstrukcije vseh treh možnih pregibov. Začnimo z leve proti desni in za vsakega od njih pogledamo, kaj dobimo:

1. V prvem primeru se nam točka O preslika v točko $(2, 2)$, točka T pa v točko $(-4, -6)$, torej je kot $\theta = 45^\circ$, kar pomeni $x_{45^\circ} = -\tan 45^\circ = -1$. Preverimo, ali x_{45° res reši našo enačbo. Zares, $(-1)^3 - 7 \cdot (-1) - 6 = 0$.
2. Točka T se v drugem primeru preslika ravno v presečišče premic L_1 in L_2 , torej v točko $(2, -6)$. Pregib torej premico s , ki je v našem primeru kar x -os, seka v točki $(5, 0)$ (ker je presečišče središče doljice s krajišči v točki T in njeni sliki). Rešitev x_θ lahko preberemo kar iz zadnjega pravokotnega trikotnika preko definicije kotne funkcije tangens: $x_\theta = -\tan \theta = -6/3 = -2$. In res je $(-2)^3 - 7 \cdot (-2) - 6 = 0$.
3. V zadnjem primeru pa se v presečišče premic L_1 in L_2 preslika izhodišče O . Zato pregib premico r seka v točki $(1, -3)$ in za kot θ gledamo prvi pravokotni trikotnik. Dobimo $x_\theta = -\tan \theta = -(-3)/1 = 3$. Preverimo rešitev in dobimo $3^3 - 7 \cdot 3 - 6 = 0$.



Slika 77: Pregibi, ki rešijo kubično enačbo $x^3 - 7x - 6 = 0$. Vzeto iz [21, str. 91–92].

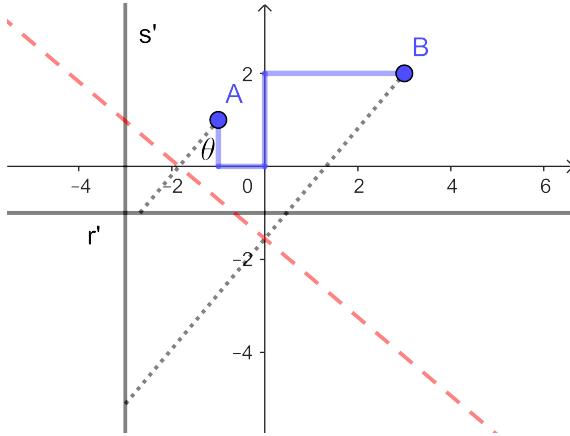
Seveda se da enačbo $x^3 - 7x - 6 = 0$ hitreje rešiti z računanjem, vendar je ravno zaradi tega lep primer za uporabo Lillove metode z Belochinim pregibom, saj se da rešitve iz konstrukcije (ob natančnih prepogibih) takoj prebrati.

6.2.2 Hatorijeva konstrukcija

Japonski matematik Koshiro Hatori navaja postopek, ki je zelo podoben Belochinem postopku, vendar ga je avtor iznašel neodvisno od Belochinega dela in to kar pol stoletja za tem. Brez škode za splošnost predpostavi $a = 1$ in za reševanje enačbe $x^3 + bx^2 + cx + d = 0$ sledi naslednjim korakom (slika 78):

1. V koordinatnem sistemu označimo točki $A = (b, 1)$ in $B = (d, c)$ ter premici $r' : y = -1$ in $s' : x = -d$.

2. Opravimo pregib, ki točko A položi na premico r' ter točko B na premico s' (to je ravno Belochin pregib).
3. Koeficient opravljenega pregiba je rešitev dane enačbe.



Slika 78: Hatorijeva konstrukcija za enačbo $x^3 - x^2 + 2x + 3 = 0$.

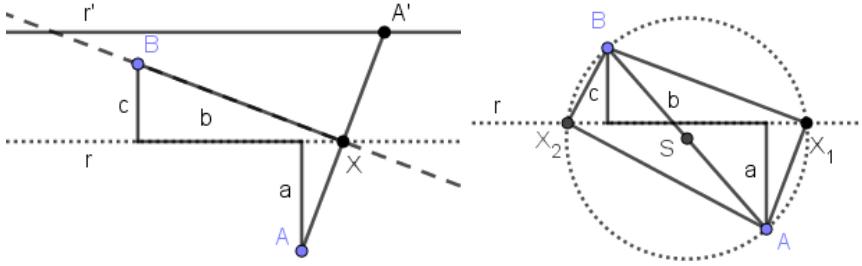
Tako vidimo, da je to v resnici ravno Belochin postopek, le da Hatori ne omeni premic r in s ter da se želva na začetku svoje poti ne nahaja v koordinatnem izhodišču temveč v točki A , je najprej usmerjena navzdol in se obrača v negativno smer (njena pot je na sliki 78 označena z modro). Če izrazimo koeficient pregiba preko kota θ , ki ga ob začetni točki A omejujeta modra in črna prekinjena daljica, res dobimo $k = -\tan \theta$. Za geometrijsko razlago preko parabol gl. [14].

Opomba 6.4. Seveda bi lahko vzeli katerikoli $a \in \mathbb{Q}$ in vzeli premico $r' : y = -a$.

6.2.3 Reševanje kvadratne enačbe z Lillovo metodo

Lillovo metodo lahko uporabimo tudi za reševanje kvadratne enačbe $ax^2 + bx + c = 0$, kjer $a, b, c \in \mathbb{Q}$ in $a \neq 0$. Na enak način v koordinatni sistem zarišemo želvino pot, ki se začne v točki A in konča v točki B . Za razliko od Belochinega postopka tu ne uporabimo Belochinega pregiba, temveč pregib iz operacije O6. Namesto dveh premic r in s imamo le eno – naj bo r nosilka daljice b . Kot prej – na razdalji a na drugi strani točke A – označimo še njeni vzporednico r' . Konstruiramo pregib, ki gre skozi točko B in točko A položi na premico r' . Njegovo presečišče s premico r nam določi točko X , kjer se žarek iz točke A pod pravim kotom odbije v točko B (primer na sliki 79 (levo) za $c < 0$). S tem je kot θ določen. Vemo že, da sta možana največ dva pregiba in da je število pregibov enako številu realnih rešitev enačbe.

Opomba 6.5. Zelo lepa je konstrukcija točke X z evklidskim orodjem – če začrtamo želvino pot od točke A do točke B , narišemo premico r kot prej in poiščemo središče S daljice AB , je točka X po Talesovem izreku ravno presek krožnice s središčem v točki S in premerom AB ter premice r .



Slika 79: Lillova metoda z operacijo O6 (levo) in Talesovim izrekom (desno).

6.3 Alperinova in Geretschlägerjeva metoda za reševanje kubičnih enačb

V razdelku 6.1 smo reševali kvadratno enačbo preko konstrukcije tangente na parabolo (operacija O6), ki je bila določena s koeficienti iz dane enačbe. Nato smo spoznali Belochin postopek, ki se poslužuje Belochinega pregiba (operacije O7), vendar brez povezave s parabolami. To povezavo bomo pogledali sedaj.

Alperin v [1, str. 129] sicer namesto splošne kubične enačbe vzame zreducirano¹² obliko $x^3 + cx + d = 0$, kjer sta $c, d \in \mathbb{Q}$. Iz njenih koeficientov izbere naslednji paraboli:

- $\mathcal{P}_1 : \left(y - \frac{c}{2}\right)^2 = 2dx$ z goriščem v točki $(\frac{d}{2}, \frac{c}{2})$ in premico vodnico $x = -\frac{d}{2}$ in
- $\mathcal{P}_2 : x^2 = 2y$ z goriščem v točki $(0, \frac{1}{2})$ in premico vodnico $y = -\frac{1}{2}$.

Avtor nato opravi Belochin pregib, ki gorišče vsake parabole položi na njen premico vodnico in tako konstruira skupno tangentno. Ker sta paraboli pravokotni, je tak pregib en sam. Sedaj analitično izrazimo koeficient skupne tangente. Naj bodo k iskani koeficient, (x_0, y_0) točka tangentnosti na prvi in (x_1, y_1) točka tangentnosti na drugi paraboli. Iz enačbe prve parabole z implicitnim odvajanjem in upoštevanjem $dy/dx = k$ dobimo

$$2\left(y - \frac{c}{2}\right)\frac{dy}{dx} = 2d, \text{ torej } y_0 = \frac{d}{k} + \frac{c}{2} \text{ in } x_0 = \frac{\left(y_0 - \frac{c}{2}\right)^2}{2d} = \frac{d}{2k^2},$$

iz enačbe druge parabole pa

$$2x = 2\frac{dy}{dx}, \text{ torej } x_1 = k \text{ in } y_1 = \frac{k^2}{2}.$$

Ko koordinate vstavimo še v formulo za koeficient premice skozi dve točki, dobimo

$$k = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{\frac{k^2}{2} - \frac{d}{k} - \frac{c}{2}}{k - \frac{d}{2k^2}}.$$

Enačbo poenostavimo in res dobimo $k^3 + ck + d = 0$, torej je koeficient skupne tangente rešitev izvorne zreducirane kubične enačbe.

¹²V splošno kubično enačbo $x^3 + bx^2 + cx + d = 0$ vpeljemo novo spremenljivko $z = x - b/3$. Bralec lahko za vajo izračuna, da s tem dobimo splošno kubično enačbo za z brez kvadratnega člena.

Opomba 6.6. Na enak način je do rešitve kubične enačbe še pred Alperinom prišel Robert Geretschläger (gl. [10, str. 368–369]). V članku pa za razliko od Alperina rešuje *splošno* kubično enačbo oblike $x^3 + bx^2 + cx + d = 0$. Pri tem vzame paraboli $\mathcal{P}_1 : (y - c/2)^2 = 2d(x + b/2)$ z goriščem v točki $(-b/2 + d/2, c/2)$ in premico vodnico $x = -b/2 - d/2$ ter parabolo \mathcal{P}_2 kot zgoraj. V razdelku 6.5 bomo njegovo metodo dokazali še preko dualnih stožnic.

6.4 Reševanje starogrških problemov preko reševanja enačb

V poglavju 4 smo si že pogledali več konstrukcij, ki z Belochinim pregibom rešijo problem podvojitve kocke in trisekcije kota. Poglejmo na problema še pod lučjo novega znanja reševanja enačb z origamijem

Pri podvojitvi kocke rešujemo enačbo $x^3 - 2 = 0$. Bralec je povabljen, da jo reši z Belochinim postopkom preko Lillove metode. V resnici smo to že storili v v razdelku, kjer smo spoznali Belochin kvadrat. Konstrukcija kubičnega korena števila 2, ki smo jo takrat spoznali (gl. sliko 74), je ravno konstrukcija po Belochinem postopku, le da je zrcaljena preko abscisne osi in premaknjena za enoto v levo.

Enačbo lahko rešimo tudi z Alperinovim postopkom ali katerokoli drugo metodo za reševanje kubičnih enačb, ki je omenjena v tem poglavju. Videli smo že veliko podobnih metod in ni nemogoče, da kateri od postopkov izhajajo iz drugih.

Pri problemu trisekcije kota se spomnimo zveze $\cos 3\theta = 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta$. Za dani kot 3θ iščemo $x = \cos \theta$, torej rešujemo enačbo $4x^3 - 3x - \cos 3\theta = 0$. Zopet lahko izberemo poljubno metodo; po Geretschlägerjevem oz. Alperinovem postopku iščemo koeficient skupne tangent na paraboli z goriščema v $((-\cos 3\theta)/8, -3/8)$ in $(0, 1/2)$ ter premicama vodnicama $x = (\cos 3\theta)/8$ in $y = -1/2$ [10, str. 370].

6.5 Kubična in kvartična enačba v projektivni ravnini

Matematika Edwards in Shurman se v [6] ukvarjata z reševanjem enačb tretje in četrte stopnje preko iskanja skupnih tangent na določeni stožnici, pri tem pa uporabljata princip Belochinega pregiba. Tematike se lotevata na celovit način z obravnavo splošnih enačb stožnic v projektivni ravnini.

Pri kubični enačbi iz njenih koeficientov določita gorišči in premici vodnici dveh parabol, rešitve enačbe pa so *koeficienti* skupnih tangent. Tak postopek smo sicer spoznali že v razdelku 6.3, tu pa ga bomo pogledali pod malo drugačno lučjo.

Postopek za reševanje kvartične enačbe je podoben, vendar avtorja z njim rešita le kvartične enačbe v reducirani obliki, ki izpolnjujejo še nek dodaten pogoj. Iz njenih koeficientov določita parabolo in krožnico, rešitve pa so *začetne vrednosti* skupnih tangent.

Konstrukcija skupne tangente na parabolo in krožnico

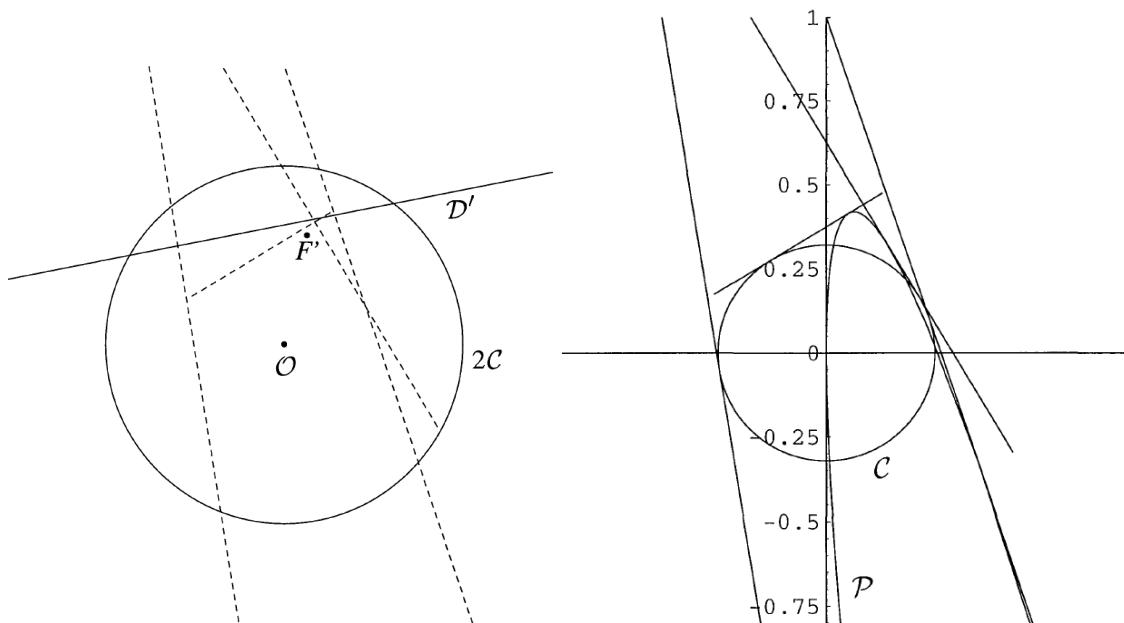
Ker do sedaj poznamo le konstrukcijo skupne tangente na dve paraboli, je na mestu vprašanje, kako postopati v primeru, ko imamo namesto ene parabole krožnico. Konstrukcija je v svojem bistvu zelo enostavna:

1. Naj bosta dani parabola z znanima goriščem in premico vodnico ter krožnica

z znanima središčem polmerom. Teh dveh stožnic ni potrebno risati, ker potreujemo omenjene podatke.

2. Zarišemo krožnico z istim središčem in dvakratnim polmerom.
3. Po zgledu Belochinega pregiba gorišče prepognemo na premico in hkrati središče na rob ravnokar narisane krožnice.

Po operaciji O6 je pregib tangenten na dano parabolo, ker pa je po konstrukciji simetrala in pravokoten na polmer večje krožnice, je tangenten tudi na krožnico z originalnim polmerom. Na sliki 80 sta desno prikazani dani parabola \mathcal{P} in krožnica \mathcal{C} , levo pa konstrukcije iz danih podatkov – gorišče F' , premica vodnica D' , središče O ter krožnica $2\mathcal{C}$ z dvakrat večjim polmerom. Na obeh slikah so konstruirani vsi štirje pregibi oz. skupne tangente.



Slika 80: Konstrukcija skupnih tangent na krožnico in parabolo. Vzeto iz [6, str. 24–25].

Opomba 6.7. V tem razdelku moramo za potrebe reševanja izjemoma dopustiti uporabo šestila, s katerim iz koeficientov kvartične enačbe konstruiramo krožnico.

Skupne tangente na dve paraboli ali na parabolo in krožnico zdaj znamo konstruirati, pravo vprašanje pa je, kateri stožnici določa dana kubična oz. kvartična enačba. Kot omenjeno že v uvodu razdelka, si avtorja pri tem pomagata s projektivno ravnino.

Projektivna ravnina in dualnost

Poglejmo si model projektivne ravnine v \mathbb{R}^3 , ki ga označimo s $P(\mathbb{R}^3)$. Točke našega modela so predstavljene z evklidskimi premicami skozi koordinatno izhodišče, premice pa z evklidskimi ravninami, ki vsebujejo izhodišče. Predstavljammo si, da realno ravnino \mathbb{R}^2 postavimo na nivo $z = 1$.

- Vsaka točka $P = (x_0, y_0, 1)$ na ravnini $z = 1$ je predstavljena z evklidsko premico, ki gre skozi koordinatno izhodišče in točko P . Ta premica je točka projektivne ravnine $P(\mathbb{R}^3)$ in jo označimo z $[x_0 : y_0 : 1]$. Ker za poljuben $\lambda \in \mathbb{C}$ velja, da točka $(\lambda x_0, \lambda y_0, \lambda)$ leži na isti premici, je $[\lambda x_0 : \lambda y_0 : \lambda] = [x_0 : y_0 : 1]$, tj. ti dve točki projektivne ravnine sta enaki, saj v \mathbb{R}^3 določata isto premico.
- Premica $l : ax + by + c = 0$ na ravnini $z = 1$ je predstavljena z evklidsko ravnino, ki vsebuje l in koordinatno izhodišče. Ta ravnina je premica projektivne ravnine $P(\mathbb{R}^3)$ in je množica določenih projektivnih točk $\{[x : y : z] ; ax + by + cz = 0\}$.

Vsaki dve evklidski ravnini v \mathbb{R}^3 , ki vsebujeta koordinatno izhodišče, se sekata v eni evklidski premici, torej se vsaki dve premici (predstavljeni z ravninama) v tem modelu res sekata v eni točki (predstavljeni s premico v presečišču teh dveh ravnin). Evklidske premice skozi koordinatno izhodišče, ki ne sekajo ravnine $z = 1$, predstavljajo točke, ki jih imenujemo *točke v neskončnosti*. To so natanko evklidske premice v ravnini xy , ki gredo skozi koordinatno izhodišče. Sama ravnina xy predstavlja t. i. *premico v neskončnosti*.

Ključna lastnost projektivne ravnine je, da se v njej sekajo prav vse projektivne premice. Presek poljubne projektivne premice s premico v neskončnosti je namreč prav tako točka, in sicer ravno *točka v neskončnosti*. Tako si lahko projektivno ravnino lahko predstavljamo kot običajno ravnino, ki ima dodano premico v neskončnosti ($z = 0$). Zaradi te lastnosti so točke in premice iz projektivne ravnine v incidenčni relaciji in veljajo aksiomi projektivne ravnine:

P1 Vsak par točk leži na natanko eni premici.

P2 Vsak par premic se seka v natanko eni točki.

P3 Obstajajo 4 točke, od katerih nobena trojica ni kolinearne.

V projektivni ravnini velja *načelo dualnosti* – vsaka značilnost, ki velja za premice, velja tudi za točke in obratno. Na splošno lahko v vsakem izreku ravninske projektivne geometrije zamenjamo besedi “točke” in “premice” med sabo, pa bo izrek še vedno veljal. Če malo preoblikujemo aksioma P1 in P2, vidimo, da sta drug drugemu dualna izjava:

- Dve točki enolično določata premico (tj. tisto, ki poteka skozi obe točki).
- Dve premici enolično določata točko (tj. presečišče).

Dualna projektivna ravnina $P(\mathbb{R}^3)$ je projektivna ravnina $P^*(\mathbb{R}^3)$. Dual duala projektivne ravnine je originalna projektivna ravnina.

Stožnice v projektivni ravnini

Spomnimo se, da je stožnica v realni ravnini \mathbb{R}^2 dana z enačbo

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0,$$

kjer so a_i poljubna realna števila. V projektivni ravnini je stožnica definirana podobno, vendar potrebujemo nekaj več ozadja.

Definicija 6.8. Naj bo $F \in \mathbb{R}[X, Y, Z]$ dan *homogen* polinom *drugega reda* oblike

$$F(x, y, z) = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + a_{33}z^2 \quad (6.2)$$

z $a_i \in \mathbb{R}$. Stožnica v realni projektivni ravnini $P(\mathbb{R}^3)$ je množica $\mathcal{S} \subset P(\mathbb{R}^3)$, ki vsebuje natanko ničle tega polinoma, tj.

$$\mathcal{S} = \{[x : y : z] \in P(\mathbb{R}^3); F(x, y, z) = 0\}.$$

Opomba 6.9. Med enačbama stožnic v obeh ravninah obstaja povezava. Razširitvi enačbe stožnice iz \mathbb{R}^2 v $P(\mathbb{R}^3)$ rečemo *homogenizacija*, obratnemu procesu (zožitvi stožnice na afini del, ravnino $z = 1$) pa *dehomogenizacija*.

Naj sedaj stožnici \mathcal{S} v $P(\mathbb{R}^3)$ pripada homogenizirana enačba 6.2, kar lahko krajše zapišemo v obliki

$$\mathcal{S} : v^\top M v = 0, \text{ kjer sta } v = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \text{ in } M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}. \quad (6.3)$$

Pri tem je realna simetrična matrika M definirana do neničelnega skalarnega večkratnika natančno. Stožnica \mathcal{S} je *neizrojena* (ni unija dveh premic ali ene, dvojno štete premice), če ima poln rang, torej rang $M = 3$ ozziroma ekvivalentno $\det M \neq 0$. V nadaljevanju bomo delali le z neizrojenimi stožnicami, torej vedno obstaja inverz matrike M , ki je prav tako simetričen.

Iz prvega minorja matrike M lahko takoj preberemo, za katero vrsto neizrojene stožnice gre (za razlago gl. [39]). Naj bo $A_M = a_{11}a_{22} - a_{12}^2$. Potem velja:

- \mathcal{S} je hiperbola, če in samo če $A_M < 0$,
- \mathcal{S} je parabola, če in samo če $A_M = 0$ in
- \mathcal{S} je elipsa, če in samo če $A_M > 0$. Če poleg tega velja še $a_{11} = a_{22}$ in $a_{12} = 0$, je \mathcal{S} krožnica.

Definicija 6.10. Naj bo $\mathcal{S} \subset P(\mathbb{R}^3)$ stožnica v realni projektivni ravnini. Njen dual imenujemo *dualna stožnica* in je množica $\mathcal{S}^* \subset P^*(\mathbb{R}^3)$ v dualni projektivni ravnini, katere elementi so tangente premice na stožnico \mathcal{S} , tj.

$$\mathcal{S}^* = \{q \in P^*(\mathbb{R}^3) \mid q \text{ je tangentna na } \mathcal{S} \text{ v neki točki } p \in \mathcal{S}\}.$$

Opomba 6.11. Stožnica \mathcal{S} je torej ovojnica dualne stožnice \mathcal{S}^* .

Če stožnici \mathcal{S} pripadata polinom $F(x, y, z)$ in posledično matrika M , je tangenta na točko $p \in \mathcal{S}$ dana z enačbo $xF_x(p) + yF_y(p) + zF_z(p) = 0$. Torej je

$$\mathcal{S}^* = \bigcup_{p \in \mathcal{S}} \{[x : y : z] \mid xF_x(p) + yF_y(p) + zF_z(p) = 0\}.$$

Od prej vemo, da so premice v $P^*(\mathbb{R}^3)$ definirane enako kot točke v $P(\mathbb{R}^3)$ in obratno, zato lahko pišemo

$$\mathcal{S}^* = \{[F_x(p) : F_y(p) : F_z(p)] \mid p \in \mathcal{S}\}.$$

Hitro se lahko prepričamo, da velja $[F_x(p) \ F_y(p) \ F_z(p)]^\top = 2M \cdot p$. Če je $p \in \mathcal{S}$ in $q \in \mathcal{S}^*$ tangenta na točko p , potem (z upoštevanjem homogenosti koordinat točk v projektivni ravnini) velja $q = M \cdot p$. Ker je matrika M obrnljiva, to med drugim pomeni, da je preslikava $\mathcal{S} \rightarrow \mathcal{S}^*$ s predpisom $p \mapsto Mp$ je bijekcija med \mathcal{S} in \mathcal{S}^* . Ker velja

$$q^\top M^{-1}q = (Mp)^\top M^{-1}(Mp) = p^\top M^\top M^{-1}Mp = p^\top Mp = 0,$$

je \mathcal{S}^* res stožnica, ki ji pripada matrika M^{-1} .

Opomba 6.12. Vidimo, da je dualna stožnica dualne stožnice res originalna stožnica, kar ustreza principu dualnosti.

Poglejmo, kako nam znanje o stožnicah in njihovih dualnih stožnicah pomaga pri reševanju kubičnih in kvartičnih enačb. Naj bosta \mathcal{S}_1 in \mathcal{S}_2 stožnici s pripadajočima simetričnima obrnljivima matrikama M_1 in M_2 . Potem je njuna skupna tangenta skupna točka njunih dualnih stožnic \mathcal{S}_1^* in \mathcal{S}_2^* . Torej iščemo $q \in \mathcal{S}_1^* \cap \mathcal{S}_2^*$, ki reši sistem enačb

$$q^\top M_1^{-1}q = 0 \quad \text{in} \quad q^\top M_2^{-1}q = 0. \quad (6.4)$$

Reševanje kubične enačbe

Vzemimo kubično enačbo oblike $x^3 + bx^2 + cx + d = 0, d \neq 0$. Za stožnici vzamemo naslednji paraboli:

- $\mathcal{P}_1 : (y + c)^2 = -4d(x - b)$ z goriščem $F_1(b - d, -c)$ in premico vodnico $L_1 : x = b + d$,
- $\mathcal{P}_2 : x^2 = -4y$ z goriščem $F_2(0, -1)$ in premico vodnico $L_2 : y = 1$.

Iz enačb parabol zapišemo njuni matriki

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2d \\ 0 & 1 & c \\ 2d & c & c^2 - 4bd \end{bmatrix} \quad \text{in} \quad M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

ter izračunamo njuna inverza

$$M_1^{-1} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} b & -c/2 & 1/2 \\ -c/2 & d & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{in} \quad M_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Naj bo $q = [A : B : C] \in \mathcal{P}_1^* \cap \mathcal{P}_2^*$ skupna tangenta na paraboli \mathcal{P}_1 in \mathcal{P}_2 . Iz sistema enačb 6.4 dobimo nov sistem

$$bA^2 - cAB + AC + dB^2 = 0 \quad \text{in} \quad -BC = A^2. \quad (6.5)$$

Da dobimo tangentu na paraboli \mathcal{P}_1 in \mathcal{P}_2 v afni ravnini $z = 1$, ravnokar dobljeni enačbi normaliziramo – upoštevamo $z = 1$ in brez škode za splošnost (ker so koordinate projektivnih točk homogene) predpostavimo $B = -1$. S tem tangentu $Ax + By + Cz = 0$ dehomogeniziramo v premico $y = Ax + C$ v afni ravnini. Druga enačba v sistemu 6.5 se tako preuredi v $C = A^2$ in ko to vstavimo v prvo, dobimo enačbo

$$A^3 + bA^2 + cA + d = 0,$$

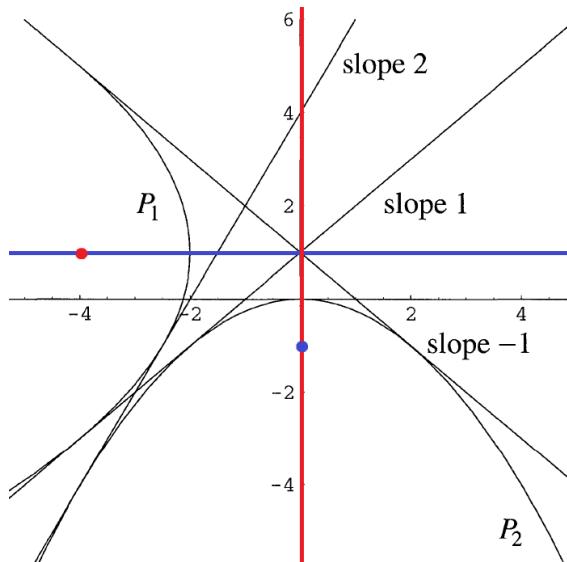
kar pomeni, da nam A , koeficient skupne tangente, reši izvorno kubično enačbo.

Opomba 6.13. Opazimo, da je ideja postopka identična kot pri Geretschlägerjevi metodi (opomba 6.6), le da so tu spremenljivke v enačbah parabol pomnožene s faktorjem -2 . To je torej alternativen dokaz velavnosti metode preko projektivne geometrije.

Primer: Rešimo kubično enačbo $x^3 - 2x^2 - x + 2 = 0$ po zgornjem postopku. Vzamemo paraboli

- $\mathcal{P}_1 : (y - 1)^2 = -8(x + 2)$ z goriščem $F_1(-4, 1)$ in premico vodnico $L_1 : x = 0$ ter
- $\mathcal{P}_2 : x^2 = -4y$ z goriščem $F_2(0, -1)$ in premico vodnico $L_2 : y = 1$

in v koordinatni sistem zarišemo njuni gorišči in premici vodnici. Z Belochinim prepogibom konstruiramo tri skupne tangente (slika 81) in razberemo njihove koeficiente. Če smo pri prepogibanju natančni, smo res dobili rešitve enačbe 2, 1 in -1 .



Slika 81: Konstrukcija skupnih tangent na paraboli. Preurejeno iz [6, str. 22].

Reševanje kvartične enačbe

Kot že povedano, sledeči postopek ne rešuje splošne enačbe četrte stopnje, temveč njeni zreducirano¹³ obliko

$$x^4 + bx^2 + cx + d = 0, d \neq 0. \quad (6.6)$$

Smiselno predpostavimo $c \neq 0$, da se enačba z uvedbo nove spremenljivke za x^2 ne more prevesti na kvadratno enačbo.

Po Bezoutovem izreku (gl. [40, izrek 2.4]) imata dve različni in neizrojeni stožnici v kompleksni projektivni ravnini štiri presečišča vključno z večkratnostjo. Presečišča dualnih stožnic \mathcal{S}_1^* in \mathcal{S}_2^* v kompleksni dualni projektivni ravnini so torej štiri

¹³V splošno kubično enačbo $x^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0$ vpeljemo novo spremenljivko $z = x - b/4$. Bralec lahko za vajo izračuna, da s tem dobimo splošno kvartično enačbo za z brez kubičnega člena.

tangente na stožnici \mathcal{S}_1 in \mathcal{S}_2 , ki nastopajo v konjugiranih parih – po nič, dve ali štiri tangente (šteto z večkratnostjo). Dve paraboli imata skupno tangentu v neskončnosti, torej ostanejo le še tri afine tangente, kar ni dovolj za vse rešitve kvartične enačbe. Zato tu ne moremo vzeti dveh parabol.

Poskusimo najprej z metodo, ki smo jo uporabili pri reševanju kubične enačbe. Avtorja pri predpostavki $bd - c^2 \neq 0$ vzameta naslednji stožnici:

- $\mathcal{S} : dx^2 + 2cxy + by^2 + bd - c^2 = 0$ in
- parabolo od prej, tj. $\mathcal{P} : x^2 = -4y$.

Bralec je povabljen, da po enakem postopku kot prej izpelje, da koeficient skupne tangente $y = Ax + C$ reši enačbo 6.6. Stožnicama \mathcal{S} in \mathcal{P} zaporedoma pripadata matriki

$$M_{\mathcal{S}} = \begin{bmatrix} d & c & 0 \\ c & b & 0 \\ 0 & 0 & bd - c^2 \end{bmatrix} \text{ in } M_{\mathcal{P}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ker za glavni minor matrike $M_{\mathcal{S}}$ velja $A_{M_{\mathcal{S}}} = bd - c^2 \neq 0$, stožnica \mathcal{S} ni parabola in ker velja $c \neq 0$, ne more biti niti krožnica. Torej je lahko le elipsa ali hiperbola. Tu pa nastane težava, saj avtorja nista uspela najti splošne geometrijske metode za konstrukcijo skupne tangente na parabolo in elipso oz. hiperbolo. Ker pa znamo konstruirati skupno tangentu na parabolo in krožnico, predlagata malo prilagojen postopek, s katerim določita parabolo in krožnico, katere skupno tangentu iščemo. Postopek je sicer algebraično manj eleganten, vendar je geometrijsko toliko lažje izveden.

Pri danih koeficientih b, c, d enačbe 6.6 vpeljimo novi oznaki

$$e = \frac{\sqrt{bd - c^2}}{d} \text{ in } r = |e|\sqrt{-d},$$

iz česar sledita enakosti, ki ju bomo kasneje uporabili pri izpeljavi:

$$b = de^2 + \frac{c^2}{d} \text{ in } -\frac{de^2}{r^2} = 1. \quad (6.7)$$

Opomba 6.14. Smiselno za koeficiente b, c, d predpostavimo $bd - c^2 > 0$ in $d < 0$. Zato s tem postopkom ne moremo reševati poljubnih enačb četrte stopnje.

Avtorja nato predlagata naslednji matriki za dualni stožnici \mathcal{C}^* in \mathcal{P}^* :

$$M_{\mathcal{C}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/r^2 \end{bmatrix} \text{ in } M_{\mathcal{P}}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & de/2 \\ 0 & -d & c/2 \\ de/2 & c/2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Če izračunamo njuna inverza, dobimo matriki

$$M_{\mathcal{C}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 \end{bmatrix} \text{ in } M_{\mathcal{P}} = -\frac{1}{d^3 e^2} \begin{bmatrix} c^2 & -cde & -2d^2 e \\ -cde & d^2 e^2 & 0 \\ -2d^2 e & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Iz njiju zapišemo predpisa stožnic v afini ravnini ($z = 1$) in dobimo:

- krožnico $\mathcal{C} : x^2 + y^2 = r^2$ s središčem v $S(0, 0)$ in polmerom r ter
- parabolo $\mathcal{P} : c^2x^2 - 2cdexy + d^2e^2y^2 - 4d^2ex = 0$ (ker je glavni minor $A_{M_P} = 0$, je \mathcal{P} res parabola).

Z določitvijo gorišča in premice vodnice parabole \mathcal{P} se bomo ukvarjali pozneje; najprej algebroično poiščimo skupno tangento na dani stožnici.

Naj bo $q = [A : B : C]$ presečišče dualnih stožnic \mathcal{C}^* in \mathcal{P}^* . Iz sistema enačb 6.4 dobimo nov sistem

$$A^2 + B^2 = \frac{C^2}{r^2} \text{ in } deAC - dB^2 + cBC = 0. \quad (6.8)$$

Z določitvijo $B = -1$ in $z = 1$ zopet dobimo afino obliko skupne tangente kot $y = Ax + C$. Ko B vstavimo v sistem 6.8, prvo enačbo množimo z de^2C^2 , drugo kvadriramo, delimo z d in vstavimo v prvo enačbo, dobimo

$$-\frac{de^2}{r^2}C^4 - (de^2 + \frac{c^2}{d})C^2 + 2cC + d = 0.$$

V dobljeno enačbo vstavimo enakosti 6.7 in dobimo

$$C^4 + bC^2 + 2cC + d = 0,$$

kar pomeni, da nam C , začetna vrednost skupne tangente oz. njeno presečišče z ordinatno osjo, reši izvorno kvartično enačbo 6.6.

Sedaj poiščimo še gorišče in premico vodnico parabole \mathcal{P} . Potem bo postopek konstrukcije skupne tangente, kot smo ga opisali že v začetku tega razdelka – najprej narišemo krožnico s središčem S in polmerom $2r$ ter gorišče in premico vodnico parabole. Nato opravimo pregib, ki hkrati položi gorišče na premico vodnico in središče krožnice na njen rob. Presečišče pregiba z ordinatno osjo je rešitev naše enačbe (seveda poiščemo vse možne pregibe, ki so največ štirje).

Iz enačbe parabole $\mathcal{P} : c^2x^2 - 2cdexy + d^2e^2y^2 - 4d^2ex = 0$ ne moremo enostavno prebrati gorišča in premice vodnice, zato (x, y) -sistem prevedimo v (z, w) -sistem s sledečo preslikavo (od kje avtorja potegneta ta P ?):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} z \\ w \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ kjer je } P = \begin{bmatrix} c/bd & de & c^2e/b^2 \\ -e/b & c & -(bc + cde^2)/b^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Ko to vstavimo v matrično enačbo parabole

$$\mathcal{P} : [x \ y \ 1] \cdot P \cdot [x \ y \ 1]^T = [z \ w \ 1] \cdot P \cdot [z \ w \ 1]^T = 0$$

v afini ravnini, po računanju in poenostavljanju¹⁴ na koncu dobimo

$$\mathcal{P} : z^2 = 4d^3e^2w.$$

¹⁴Za izračun je potrebna programska oprema, kot je npr. Wolfram Mathematica. [imaš zračunano](#), lahko vstavim [Screenshot za dokaz, da sem zračunala?](#)

V (z, w) sistemu ima parabola gorišče v $F_{zw}(0, d^3e^2)$ in premico vodnico L_{zw} : $w = -d^3e^2$ oziroma $L_{zw} : (z, w) = (0, -d^3e^2) + t(1, 0), t \in \mathbb{R}$. Izhodišče v (x, y) -sistemu je tako v točki $O_{xy}(c^2e/b^2, -(bc + cde^2)/b^2)$. Iz tega lahko izračunamo še gorišče in premico vodnico v (x, y) -sistemu:

$$F_{xy} = P \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ d^3e^2 \\ 1 \end{bmatrix} \longrightarrow F_{xy} = O_{xy} + d^3e^2(de, c) = \left(\frac{c^2e}{b^2} + d^4e^3, -\frac{bc + cde^2}{b^2} + cd^3e^2 \right),$$

$$L_{xy} = P \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 \\ -d^3e^2 \\ 1 \end{bmatrix} + t \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \longrightarrow L_{xy} : (x, y) = O_{xy} - d^3e^2(de, c) + t(c, -de), t \in R.$$

V eksplisitni obliki je enačba za premico vodnico

$$L_{xy} : y = -\frac{de}{c} \cdot x - \frac{1}{bc}(c^2 + bc^2d^3e^2 + bd^5e^4).$$

Kot vidimo, gorišče in premica vodnica nimata lepih predpisov, vendar je po eni strani ta metoda precej bolj zanimiva kot pretvorba kvartične enačbe na enačbe nižje stopnje in reševanje z običajno Lillovo metodo.

Primer: Na sliki 80 je zarisana konstrukcija skupnih tangent na krožnico in parabolo, ki ju dobimo iz enačbe

$$64x^4 - 177x^2 + 143x - 30 = 0 \text{ oz. } \left(x - \frac{3}{8}\right)\left(x - \frac{5}{8}\right)(x - 1)(x + 2) = 0.$$

Začetne vrednosti tangent so res v njenih rešitvah, torej v točkah z ordinatami $1, 5/8, 3/8$ in -2 . Primer je vzet iz istega vira [6, str. 25], vendar iz danih koeficientov ne dobimo "lepih" koordinat gorišča, premera ali enačbe premice, ki bi jih zmogli konstruirati z ročno natančnostjo.

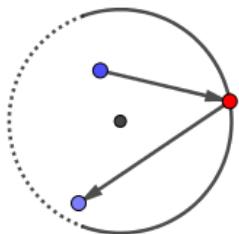
Opomba 6.15. Faucette v svojem članku opisuje geometrijsko interpretacijo reševanja *splošnih* kvartičnih enačb, iz katerih določi stožnici in išče njuna presečišča v projektivni ravnini. Za več gl. [8].

7 Alhazenov problem

Spoznamo zanimiv problem, ki izhaja že iz stare Grčije. Čez poglavje si bomo pogledali več njegovih različic in poskusili najti origami konstrukcijo njegove rešitve.

Starogrški izvor problema

V osnovi gre za problem s področja optike, ki naj bi ga zastavil grški matematik Ptolemaj (prb. 85–170 po Kr.): *Pri danem sfiričnem zrcalu in viru svetlobnega žarka poišči točko na zrcalu, od katere se bo svetlobni žarek odbil v oko opazovalca* (slika 82).

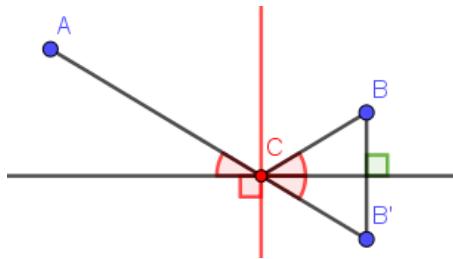


Slika 82: Ptolemajev optični problem.

Rešitev se da preformulirati v iskanje točke na krožnici, v kateri polmer krožnice razpolavlja kot, ki ga opravi svetlobni žarek. To velja zaradi *odbojnega zakona*, vendar tega v takratni Grčiji še niso poznali. Pojdimo na začetek in opazujmo, kako se je oblika Ptolemajevega problema spreminja skozi čas.

Grški matematik Heron iz Aleksandrije, med drugim znan po Heronovi formuli za izračun ploščine trikotnika z danimi dolžinami stranic, je okoli leta 100 po Kr. zastavil in rešil naslednje vprašanje, ki je različica Ptolemajevega problema: *Na isti strani premice ležita točki A in B. Poišči točko C na premici, da bo pot od točke A do B preko točke C najkrajša* (predpostavimo evklidsko metriko).

Sam točko C konstruira zelo enostavno – najprej točko B zrcali čez premico v točko B' , nato pa s točko C označi presečišče premice in daljice AB' (slika 83). Ker velja $|CB| = |CB'|$, je $|AC| + |CB| = |AC| + |CB'| = |AB'|$. Dolžina $|AB'|$ najkrajša možna razdalja med točkama A in B' , zato je točka C rešitev vprašanja.



Slika 83: Heronova konstrukcija najkrajše poti od točke A do točke B.

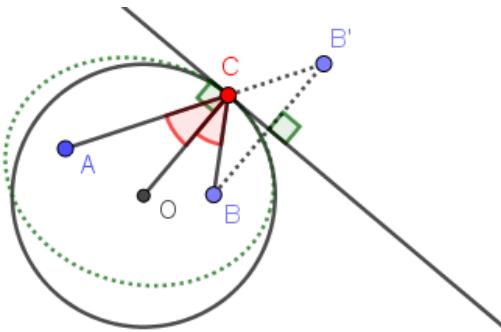
Zgornja konstrukcija pa je Heronu ponudila še nekaj – opazil je, da pravokotnica na premico skozi točko C namreč razpolavlja kot $\angle ACB$. Tako lahko njegovo vprašanje preoblikujemo v: *Na isti strani premice ležita točki A in B. Poišči točko C na premici, ki razpolavlja kot $\angle ACB$.*

Opomba 7.1. Bralcu je za vajo prepuščen enostaven premislek, kako konstruirati točko C z origamijem.

Formulacija Alhazenovega problema

S tem novim znanjem je Heron postavil temelje, na katerih je več stoletij kasneje matematik, astronom in fizik Ibn al-Haytham oz. po naše Alhazen (prb. 965–1040), ki je živel na območju današnjega Iraka, formuliral odbojni zakon, ki pravi, da sta vpadni in odbojni kot žarka svetlobe od površja enaka. Alhazen se je tudi prvi bolj poglobil v Ptolemajev problem in prišel do pomembnih ugotovitev, zato problem ponekod imenujejo tudi Ptolemaj-Alhazenuv problem, bolj pa je znan pod imenom *Alhazenuv problem* ali *biljardni problem*¹⁵.

Zopet formulirajmo problem. Namesto premice imamo torej krožnico \mathcal{K} s središčem O . Naj točki A in B ležita znotraj krožnice (za točki zunaj krožnice k reševanju problema postopamo na analogen način, je pa Alhazen originalno resda predpostavil ta položaj). Iščemo točko C na krožnici \mathcal{K} , da se bo svetlobni žarek iz točke A v točki C odbil v točko B . Na enak način kot Heron lahko premislimo, da mora polmer OC razpolavljiati kot ACB (slika 84).



Slika 84: Ena od rešitev Alhazenovega problema v splošnem.

Za razliko od Heronove konstrukcije tu ne znamo konstruirati točke B' , saj je premica, čez katero bi morali zrcaliti točko B (in tako s presečiščem daljice AB' in premice dobiti točko C), ravno tangenta v točki C . Premice torej ne moremo dobiti brez točke C , točke C pa ne moremo dobiti brez te premice. Tu se pokaže razsežnost problema in zazdeva se nam, da tudi origami konstrukcija tu ne bo enostavna.

Seveda so rešitve v nekaterih posebnih primerih enostavne – če sta točki A in B enako oddaljeni od središča O , je točka P presečišče simetrale daljice AB oz. kota $\angle AOB$ s krožnico. V nadaljevanju bomo obravnavali le še en poseben primer, pri katerem obstaja zelo enostavna origami konstrukcija rešitve, sicer pa predpostavljamo splošno lego točk A in B .

Opomba 7.2. Opazimo lahko tudi, da ima zaradi enakega vpadnega in odbojnega kota žarka v točka C lastnost točke, ki leži na *elipsi* z goriščema A in B (na sliki 84 označena s prekinjeno črto). Tangenta na krožnico v točki C je hkrati tudi tangenta na elipso v isti točki, torej lahko problem preoblikujemo v iskanje elipse z goriščema v

¹⁵Ime izhaja iz iskanja točke na robu biljardne mize, kamor želimo poslati biljardno kroglo, da se odbije v želeno smer. V našem primeru je biljardna miza okrogla oblike namesto pravokotne.

A in B , ki so tangentne na krožnico \mathcal{K} . Vendar ne poznamo enostavnega postopka, ki bi nam lahko poiskal enačbo te elipse, saj je ta odvisna od točke C , ta pa od tangente in obratno. Torej smo zopet na istem. Bralec, ki se želi poglobiti v reševanje Alhazenovega problema z elipsami, si lahko več o tem prebere v [9] in [11, str. 26–46].

Že tisoč let nazaj je Alhazen pokazal, da se da problem rešiti geometrijsko preko stožnic in da število rešitev variira od nič do največ štiri. Njegov dokaz je zelo obsežen in bil za marsikoga zelo zapleten in predolg [45], zato je veliko matematikov za njim poskušalo poiskati enostavnejšo rešitev npr. preko kompleksnih števil in analitičnih metod v geometriji.

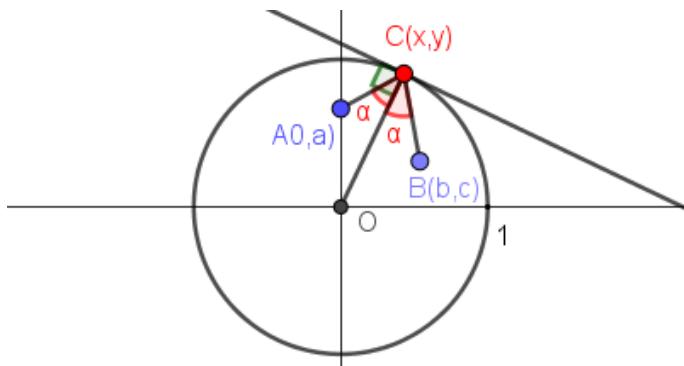
Leta 1672 je tako Huygens pokazal, da je Alhazenova rešitev ekvivalentna iskanju presečišča dane krožnice s hiperbolo (glej [35]). Algebraično rešitev problema je l. 1965 našel Jack M. Elkin, ko je problem prevedel v reševanje enačbe četrte stopnje, ki jo lahko rešimo z računalnikom. Oboje si bomo pogledali v nadaljevanju. Alperin je v [18] izpostavil, da je potemtakem problem rešljiv z origamijem. Leta 1997 je Peter M. Neumann dokazal, da ne obstaja evklidska konstrukcija rešitve, kar sicer vemo že iz Elkinovega rezultata.

Problem se da poslošiti tudi na iskanje primerne točke odboja na zrcalu parabolične, eliptične in hiperbolične oblike, kar algebraično privede do reševanja enačbe največ osme stopnje [42]. Skozi čas se je (vsaj za osnovni Alhazenov problem) razvilo še več različnih pristopov reševanja, vendar se bomo tu osredotočili na Huygensov nastavek, ki ga je japonski matematik Nishimura preko dualnih stožnic razširil na področje origamija.

Prevedba problema na reševanje kvartične enačbe

Poglejmo, kako lahko Alhazenov problem prevedemo v reševanje enačbe četrte stopnje. Naslednji nastavek za izpeljavo enačbe je vzet iz [32, str. 138–139]. Brez škode za splošnost predpostavimo, da je krožnica \mathcal{K} enotska, $O = (0, 0)$, $A = (0, a)$ in $B = (b, c)$ za take $0 \leq a, b, c \leq 1$, da te točke med sabo paroma ne sovpadajo (slika 85). Naj bo $C = (x, y)$ iskana točka na krožnici \mathcal{K} . Iz tega sledi pogoj

$$x^2 + y^2 = 1. \quad (7.1)$$



Slika 85: Podlaga za izpeljavo kvartične enačbe za Alhazenov problem.

Naj bodo premice AC , OC in BC nosilke istoimenskih daljic in naj bo za vsako

premico i s k_i označen njen koeficient. Dobimo

$$k_{AC} = \frac{y-a}{x}, \quad k_{OC} = \frac{y}{x} \quad \text{in} \quad k_{BC} = \frac{y-c}{x-b}.$$

Označimo $\alpha = \angle ACO = \angle OCB$. Ker sta kota enaka, velja

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \tan \alpha, \\ \frac{k_{AC} - k_{OC}}{1 + k_{AC}k_{OC}} &= \frac{k_{OC} - k_{BC}}{1 + k_{OC}k_{BC}}, \\ \frac{\frac{y-a}{x} - \frac{y}{x}}{1 + \frac{y-a}{x} \cdot \frac{y}{x}} &= \frac{\frac{y}{x} - \frac{y-c}{x-b}}{1 + \frac{y}{x} \cdot \frac{y-c}{x-b}}. \end{aligned}$$

Slednjo enačbo poenostavimo in z upoštevanjem pogoja 7.1 dobimo

$$y(b + 2acx) = ab + (a + c)x - 2abx^2.$$

Enačbo kvadriramo, spet upoštevamo pogoj 7.1 in dobimo enačbo četrte stopnje (**si poračunala, tudi z wolframom, je na enem listu**):

$$4a^2(b^2+c^2)x^4 - 4a^2bx^3 + (a^2 - 4a^2b^2 + b^2 + c^2 - 4a^2c^2 + 2ac)x^2 + 2ab(a-c)x + b^2(a^2-1) = 0.$$

Enačbe četrte stopnje v teoriji znamo rešiti tako računsko kot z origamijem, vendar je to praktično precej zapleteno in delo raje prepustimo računalniku.

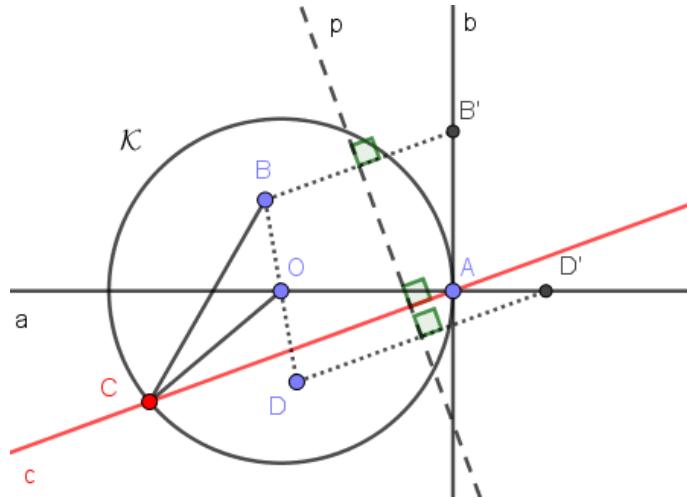
Origami konstrukcija rešitve za poseben primer

Za poseben primer izbere točk A in B pri dani krožnici na naše veselje vendarle obstaja zelo enostavna konstrukcija točke C . Scimemi v [19, str. 116-117] poda naslednji postopek (gl. sliko 86):

1. Naj bo O središče krožnice \mathcal{K} in A točka na njej. Znotraj krožnice (lahko tudi na njej) si izberemo točko B , ki ne sovpada s prejšnjima točkama.
2. Konstruiramo premico a skozi točki O in A ter njeni pravokotnico b , ki poteka skozi točko A .
3. Točko B zrcalimo čez središče O v točko D .
4. Opravimo Belochin pregib p , ki točko D postavi na premico a , točko B pa na premico b .
5. Konstruiramo pravokotnico c na pregib, ki poteka skozi točko A . Njeno drugo presečišče s krožnico \mathcal{K} označimo s C .

Trditev 7.3. Točka C je rešitev Alhazenovega problema za točke O, A, B .

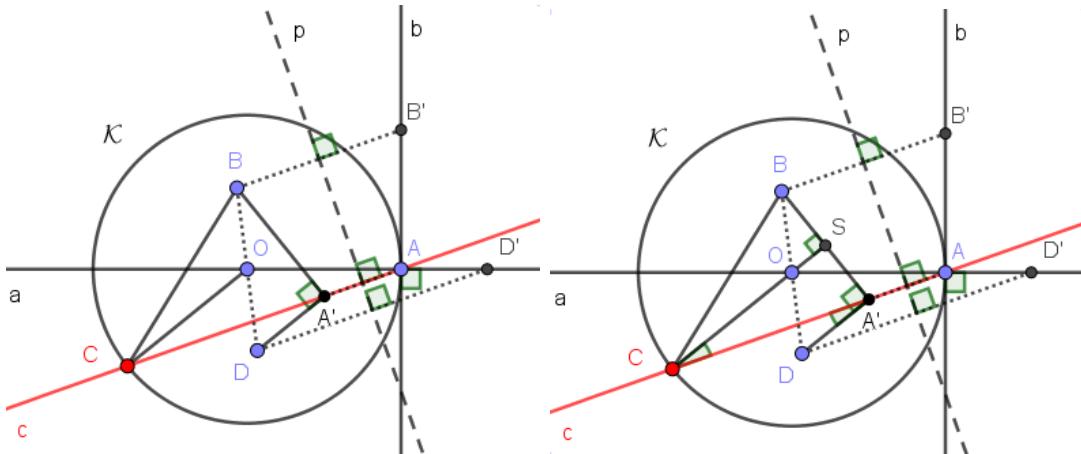
Opomba 7.4. Avtor je v svoje delo vključil tudi dokaz, vendar je v njem več nejasnosti, priložena skica pa je zavajajoča. Zato tu prilagam svoj dokaz, ki je tudi enostavnnejši.



Slika 86: Scimemijeva rešitev Alhazenovega problema, ko točka A leži na krožnici.

Dokaz. Naj bo točka A' zrcalna slika točke A čez pregib p . Zarišemo še daljici BA' in DA' . Potem zaradi simetrije čez pregib p velja $\angle BA'D = \angle B'AD' = 90^\circ$ (slika 87 levo).

Naj bo S presečišče premice CO z daljico $A'B$. Ker točki P in A ležita na krožnici K , je trikotnik $\triangle CAO$ z vrhom v središču O enakokrak. Sledi $\angle OCA = \angle CAO = \angle CA'D$. Zadnja enakost sledi iz sovršnih kotov ob točki A in simetrije čez pregib p . Torej sta kota z vrhom v točkah P in A' (na sliki 87 desno) izmenična, iz česar sledi $CS \parallel DA'$. Zato velja $\angle OSB = \angle DA'B = 90^\circ$.

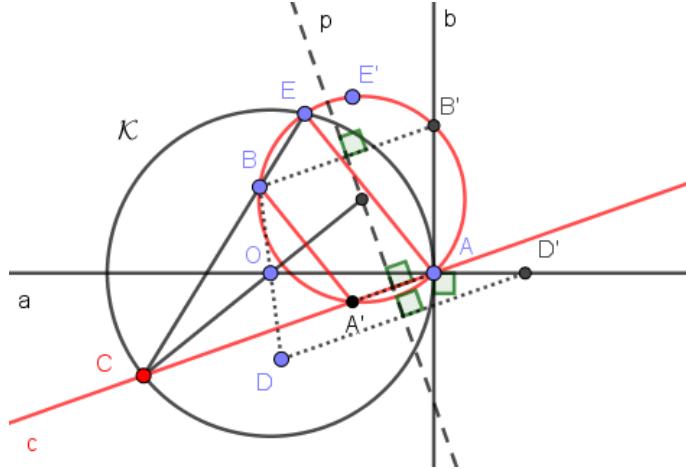


Slika 87: Geometrijski dokaz Scimemijeve konstrukcije

Trikotnika $\triangle OSB$ in $\triangle DA'B$ sta zato podobna, ker pa je O središče hipotenuze večjega trikotnika, je prvi dvakrat manjši, torej $|BS| = |SA'|$. Zaključimo, da sta zaradi skladnih katet pravokotna trikotnika $\triangle CSB$ in $\triangle CSA'$ skladna, torej res velja $\angle SCB = \angle SCA' = \angle SCA$ oziroma da daljica OC res razpolavlja kot $\angle ACB$. \square

Opomba 7.5. Zelo je zanimiv stranski produkt te konstrukcije – izkaže se namreč, da točke A, B in E (kjer je E drugo presečišče poltraka PB s krožnico K , gl. sliko 88) ter njihove slike vse ležijo na isti krožnici! Središče te krožnice pa je presečišče

poltraka CO s pregibom p . Prav tako velja $BA' \parallel EA$ in $|BE| = |A'A|$. Dokaz za to nalogu ni ključen in ga prepuščamo bralcu.



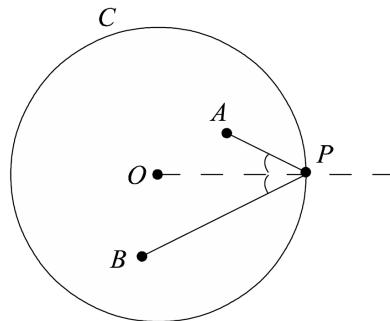
Slika 88: Stranski produkti Scimemijeve konstrukcije točke P (označeno z rdečo).

Huygensova rešitev in Nishimurijev origami postopek

Nishimura v [35] povzema, kako je Huygens preko kompleksnih števil Alhazenov problem prevedel na iskanje presečišča krožnice z določeno hiperbolo, nekaj več razlage pri izpeljavi pa opiše tudi Alperin v [18]. Nishimura od tu nadaljuje v smer, ki nam sproducira konstrukcijo rešitve z origamijem – vemo že, da presečišče dveh stožnic v projektivni ravni korespondira s skupno tangento njunih dualnih stožnic, ki smo jih spoznali v razdelku 6.5. Po novi prevedbi problema na iskanje skupne tangente na dve stožnici avtor svoj članek zaključi še z navedbo origami konstrukcije, ki konstruira rešitev Alhazenovega problema.

V nadaljevanju privzamemo avtorjeve označke objektov, ki pa se od dosedanjih ne razlikujejo veliko. Brez škode za splošnost naj bo \mathcal{C} enotska krožnica s središčem O . Znotraj nje izberemo poljubni točki A in B taki, da so točke A, B, O paroma različne (slika 89). Išemo točko $P \in \mathcal{C}$, da bo veljalo

$$\angle APO = \angle OPB. \quad (7.2)$$



Slika 89: Vprašanje Alhazenovega problema. Vzeto iz [35, str. 37].

Iz pogoja 7.2 za točko P bomo izrazili enačbo stožnice, ki v točki P seka krožnico \mathcal{C} . Poslužimo se kompleksnih števil in z njimi izrazimo oba skladna kota. Naj bodo a, b, z kompleksna števila, ki jih zaporedoma ponazarjajo točka A, B, P . Potem je kot $\angle APO$ enak kotu med številoma $a - z$ in $-z$, kot $\angle OPB$ pa kotu med številoma $b - z$ in $-z$. Kot med dvema kompleksnima številoma je argument njunega količnika (to sledi iz polarnega zapisa kompleksnih števil), zato pogoj 7.2 preoblikujemo v

$$\arg\left(\frac{a-z}{-z}\right) = \arg\left(\frac{-z}{b-z}\right).$$

Če delimo kompleksni števili z enakima argumentoma, se njuna kota odštejeta v 0, torej dobimo realno število. Njegovo konjugirano število mu je torej enako. Zato velja enačba

$$\left(\frac{a-z}{-z}\right)\left(\frac{-z}{b-z}\right)^{-1} = \overline{\left(\frac{a-z}{-z}\right)\left(\frac{-z}{b-z}\right)^{-1}}.$$

Eračbo poenostavimo in z upoštevanjem $z\bar{z} = 1$ (ker je z na enotski krožnici) dobimo

$$(ab)\bar{z}^2 - (\bar{a}\bar{b})z^2 = (a+b)\bar{z} - (\bar{a}+\bar{b})z. \quad (7.3)$$

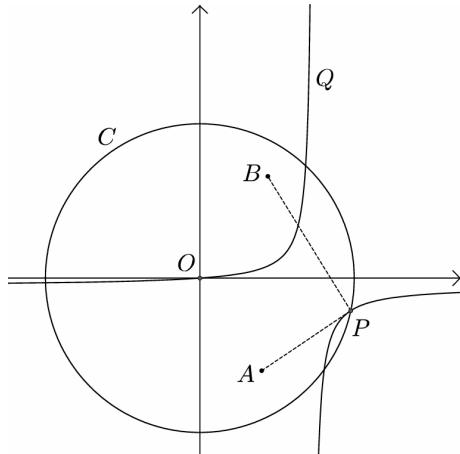
Naj bodo $q, p, r, s, x, y \in \mathbb{R}$ taka števila, da velja

$$\begin{aligned} ab &= q + ip, \\ a + b &= r + is, \\ z &= x_0 + iy_0. \end{aligned}$$

Z upoštevanjem tega se nam enačba 7.3 preoblikuje v

$$px_0^2 - 2qx_0y_0 - py_0^2 - sx_0 + ry_0 = 0.$$

Ker sta koeficienta ob kvadratnih členih različno predznačena, je to enačba hiperbole. Torej je točka P presečišče krožnice \mathcal{C} in te hiperbole (slika 90). Hungerbühler v [23] dobljeno hiperbole bolj podrobno določi, vendar to za nas ni ključno.



Slika 90: Rešitev Alhazenovega problema kot presečišče krožnice in hiperbole. Vzeto iz [35, str. 39].

Z origamijem v splošnem ne znamo konstruirati presečišč dveh stožnic, zmoremo pa konstruirati skupne tangente za nekatere primere (do sedaj smo si konkretno pogledali konstrukcije v primeru dveh parabol ter parbole in krožnice, če pri slednjem dovolimo uporabo šestila).

Za lažje nadaljnje reševanje bomo najprej malo poenostavili enačbo dobljene hiperbole. Zavrtimo krožnico \mathcal{C} (in s tem tudi točki A in B znotraj nje) okoli središča O tako, da abscisna os razpolavlja kot $\angle AOB$. S tem na splošnosti nismo izgubili. V tem primeru velja $b = k \cdot \bar{a}$ za nek $k > 0$. Potem je $ab = k \cdot a\bar{a} \in \mathbb{R}$, torej je $p = Im(ab) = 0$.

Torej iščemo presečišče krožnice \mathcal{C} in hiperbole \mathcal{Q} z naslednjima enačbama:

$$\mathcal{C} : x^2 + y^2 - 1 = 0 \quad \text{in} \quad \mathcal{Q} : 2qxy + sx - ry = 0.$$

Vemo že, da je iskanje skupne tangente na dve stožnici ekvivalentno iskanju skupnih točk njunih dualnih stožnic. Zaradi dualnosti tudi skupni točki dveh stožnic ponazarjata skupni tangenti njunih dualnih stožnic.

Bralcu za vajo prepuščamo računanje dualnih stožnic $\bar{\mathcal{C}}$ in $\bar{\mathcal{Q}}$ (gl. klasifikacijo stožnic z matriko v razdelku 6.5). Dobimo

$$\bar{\mathcal{C}} : x^2 + y^2 - 1 = 0 \quad \text{in} \quad \bar{\mathcal{Q}} : r^2x^2 + 2rsxy + s^2y^2 + 4qrx - 4qsy + 4q^2 = 0.$$

Opomba 7.6. Za izračun dualne stožnice $\bar{\mathcal{Q}}$ je potrebna predpostavka $qrs \neq 0$. Če pa je katero od števil q, r, s ničelno, je hiperbola izrojena, torej se nam problem zreducira na iskanje skupnih presečišč krožnice in dveh premic, kar je računsko zelo enostavno in nas zato ne zanima.

Dualna krožnica enotske krožnice je torej prav tako enotska krožnica, stožnica $\bar{\mathcal{Q}}$ pa je parabola (ker je $r^2 \cdot s^2 - \frac{(2rs)^2}{4} = 0$, tj. glavni minor pripadajoče matrike je ničeln). Problem je sedaj preveden na iskanje skupne tangente na krožnico \mathcal{C} in parabolo $\bar{\mathcal{Q}}$. To nas razveseli, saj to z origamijem zmoremo storiti.

Kako pa bomo iz skupne tangente določili točko P ? Iz originalnega iskanja skupne točke $P \in \mathcal{C} \cap \mathcal{Q}$ preidemo na iskanje skupne tangente $\bar{P} \in \bar{\mathcal{C}} \cap \bar{\mathcal{Q}}$. Ker je $\mathcal{C} = \bar{\mathcal{C}}$, je $\bar{P} \in \bar{\mathcal{C}}$ ravno tangenta na to krožnico v točki P . Iskana točka P je torej dotikalishče skupne tangente s krožnico \mathcal{C} . Zdaj moramo samo še določiti gorišče in premico vodnico parbole $\bar{\mathcal{Q}}$.

Trditev 7.7. Parabola $\bar{\mathcal{Q}}$ z enačbo $r^2x^2 + 2rsxy + s^2y^2 + 4qrx - 4qsy + 4q^2 = 0$ ima gorišče $F = \left(\frac{-2qr}{r^2+s^2}, \frac{2qs}{r^2+s^2} \right)$ in premico vodnico $D : sx - ry = 0$.

Dokaz. Naj bo $X = (x_0, y_0)$ točka, ki je enako oddaljena od gorišča F in premice vodnice D . Dokazati moramo, da so njene koordinate rešitve enačbe za parabolico $\bar{\mathcal{Q}}$.

Spomnimo se splošnih formul za razdaljo med točkama ter razdaljo med točko in premico – pri danih točkah $T_0 = (x_0, y_0), T_1(x_1, y_1)$ in premici $p : ax + by + c = 0$ velja

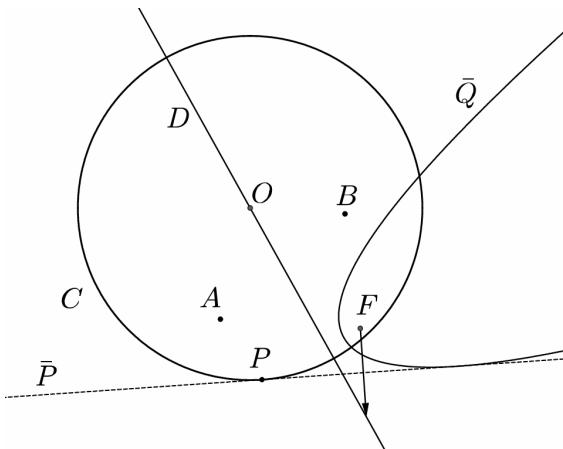
$$d(T_0, T_1) = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}, \quad d(T_0, p) = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Tako iz $d(X, F) = d(X, D)$ dobimo enačbo

$$\left(x_0 + \frac{2qr}{r^2 + s^2} \right)^2 + \left(y_0 - \frac{2qs}{r^2 + s^2} \right)^2 = \frac{(sx_0 - ry_0)^2}{r^2 + s^2}$$

Ko izraze na obeh straneh poenostavimo in malo preuredimo enačbo, dobimo $r^2x_0^2 + 2rsx_0y_0 + s^2y_0^2 + 4qr x_0 - 4qsy_0 + 4q^2 = 0$, torej je \bar{Q} res parabola. \square

Tako smo prišli do konca teoretičnega postopka. Na hitro ponovimo – pri dani enotski krožnici \mathcal{C} in točkama A, B znotraj nje (postopek velja tudi za točki zunaj krožnice) nam presečišče P krožnice \mathcal{C} s hiperbolou \bar{Q} , ki je odvisna od točk A in B , reši Alhazenov problem. Presečišče stožnic prevedemo v iskanje skupne tangente \bar{P} na krožnico \mathcal{C} in parabolo \bar{Q} , ki je dualna stožnica hiperbole. Iskana točka P je dotikališče tangente \bar{P} s krožnico \mathcal{C} (slika 91).



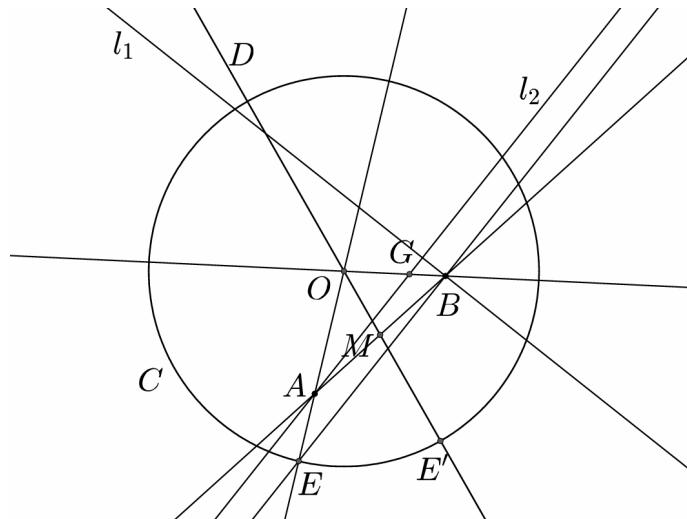
Slika 91: Konstrukcija dotikališča skupne tangente s krožnico. Vzeto iz [35, str. 40].

Vemo že, da z evklidskim orodjem problema ne moremo rešiti, saj se prevede na reševanje enačbe četrte stopnje. Ta postopek pa nam še na drug način pokaže potrebnost origamija – konstrukcija skupne tangente na krožnico in parabolo namreč z neoznačenim ravnih in šestih prav tako ni mogoča, spomnimo pa se, da jo lahko dobimo s hkratnim prepogibom središča krožnice na rob dvakrat večje krožnice in gorišča parabole na njeno premico vodnico.

Nishimura vse znanje tega razdelka združi v naslednjo origami konstrukcijo, ki konstruira rešitev Alhazenovega problema (dodala sem sprotno razlagu, ki pripomore k razumevanju delovanja konstrukcije). Naj bo \mathcal{C} enotska krožnica s središčem O v koordinatnem izhodišču kompleksne ravnine \mathbb{C} in $a = A, b = B$ točki znotraj nje. Za točki zunaj krožnice je postopek enak.

1. Prepognemo premico OA in z E označimo presečišče poltraka OA s krožnico \mathcal{C} .
2. Prepognemo premico AB .
3. Prepognemo simetralo doljice AB in središče doljice AB označimo z M . Velja $|OM| = |(a + b)/2| = \sqrt{s^2 + r^2}/2$.
4. Skozi točki O in M prepognemo premico D (ker je $M = (a + b)/2$, je to ravno premica vodnica parabole \bar{Q}). Presečišče poltraka OM s krožnico \mathcal{C} označimo z E' .
5. Prepognemo premico EB .

6. Prepognemo pravokotnico l_1 na premico EB skozi točko B .
7. Prepognemo pravokotnico l_2 na premico l_1 skozi točko A . Velja $l_2 \parallel EB$.
8. Prepognemo premico OB in njen presečišče s premico l_2 označimo z G . Iz razmerja podobnih trikotnikov $\triangle AOG$ in $\triangle EOB$ sledi $|OG| = q = Re(ab)$ (slika 92).



Slika 92: Nishimurijeva origami konstrukcija do koraka 8. Vzeto iz [35, str. 41].

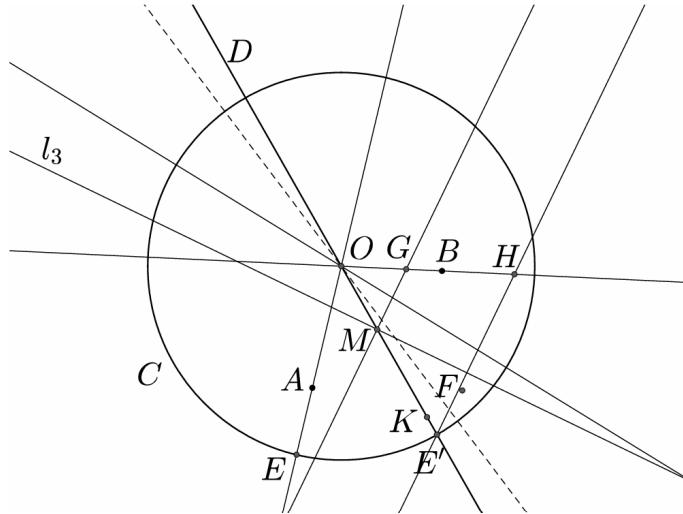
9. Prepognemo premico MG .
10. Prepognemo pravokotnico l_3 na premico MG skozi točko M .
11. Prepognemo pravokotnico na premico l_3 skozi točko E' in njen presečišče s premico OB označimo s H . Velja $MG \parallel E'H$. Iz razmerja podobnih trikotnikov $\triangle OME'$ in $\triangle OEH$ sledi $|OH| = |OG|/|OM| = 2q/\sqrt{s^2 + r^2}$.
12. Prepognemo premico skozi središče O , ki točko H preslika na premico D v točko K . Velja $|OK| = |OH|$.
13. Prepognemo premico skozi središče O , ki točko B preslika na premico OA . To je ravno simetrala kota $\angle AOB$, za katero smo prevzeli, da je to ravno abscisna os v našem koordinatnem sistemu. Sliko točke K čezno označimo s F (slika 93).

Ker je premica OF zrcalna slika premice D čez abscisno os, je njena enačba $OF \therefore$ Zaradi simetrije velja $|OF| = |OK| = |OH| = 2q/\sqrt{s^2 + r^2}$. Za točko $F = (x, y)$ tako dobimo sistem enačb

$$sx + ry = 0 \text{ in } \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{2q}{\sqrt{s^2 + r^2}},$$

katerega rešitev so ravno koordinate gorišča iskane parabole iz trditve 7.7 (lahek izračun je prepuščen bralcu), torej je točka F gorišče parabole \overline{Q} s premico vodnico D .

14. Za določitev iskane točke P samo še prepognemo tangento \overline{P} na krožnico C , ki točko F položi na premico D . Točka P je dotikališče tangente \overline{P} s krožnico C (slika 91).



Slika 93: Nishimurijeva origami konstrukcija gorišča F (korak 13). Vzeto iz [35, str. 42].

Opomba 7.8. Vemo že, da so možne največ štiri realne rešitve, a tu smo konstruirali le eno od rešitev. Ključna je izbira poltrakov z vrhom v središču O , ki so del premic OA in D (koraka 1 in 4). Iz obeh izbir dobimo dve možnosti za točko E in dve možnosti za točko E' (presečišči poltrakov s krožnico), ki nam skupaj data štiri možne rešitve. Če niso vse rešitve realne, bomo to videli, ko v naslednjih korakih po izbiri poltrakov konstrukcija na neki točki propade.

8 Zaključek

Po zgledu evklidskih konstrukcij smo v nalogi spoznali, da lahko geometrijske in algebraične probleme rešujemo tudi s prepogibanjem papirja, pri čemer je origami celo močnejše orodje od neoznačenega ravnila in šestilo. Poleg kosntrukcij vseh razdalj, ki jih lahko opravijo z evklidskimi orodji, znamo tudi z origamijem zrcaliti in vrteti točke ter prenašati razdalje, korak naprej iz evklidskih konstrukcij pa je zmožnost izvajanja operacije kubičnega kubiranja in trisekcije poljubnega kota ter prepogibanja skupnih tangent na nekatere stožnice.

Zaradi tega nam prepogibanje papirja lahko reši tudi kubične in kvartične enačbe ter konstruira več pravilnih večkotnikov kot nam ga lahko evklidsko orodje. Zaslugo za nadvlast origamija nad njim ima Belochin pregib, ki edina od origami operacij ne more biti konstruirana z neoznačenim ravnilom in šestilom.

V nalogi smo se osredotočili le na origami z enkratnimi prepogibi. Če bi dovolili opravljanje več pregibov zapored in šele nato razgrnitev papirja, se nam s tem odpre še veliko več možnosti za raziskovanje, kaj lahko z origamijem v matematiki počnemo. Med drugim lahko poljuben kot razdelimo na pet skladnih delov in rešujemo enačbe pete stopnje. Znanost se v zadnjih petdesetih letih z origamijem kot pripomočkom za raziskovanje mateamtike veliko ukvarja in tudi aktivno aplicira v naš vsakdan. Primer je efektivno zlaganje objektov samih vase, med drugim satelitov, da je strošek pošiljanja v vesolje čimmanjši.

Origami je odličen primer, kako se lahko v običajnih stvareh okoli nas skriva čista matematika. Ker je papir s prepogibi in njihovimi presečišči odličen model evklidske ravnine, je kot didaktičen pripomoček za popestritev pouka origami zelo priporočljiv. Učenci lahko z njim preko različnih pristopov raziskujejo matematiko in razvijajo abstraktno in kritično mišljenje. Iz opazovanja konstrukcije lahko sami postavljajo hipoteze in jih dokažejo ali ovržejo; lahko sami raziskujejo, kako s prepogibanjem pokazati kakšne geometrijske lastnosti. Učitelj jih mora znati usmerjati, hkrati pa jim dati svobodo raziskovanja, saj se ravno s tem krepi samostojnost, odgovornost in veselje do izzivov.

Literatura

- [1] Alperin, R. C., *A mathematical theory of origami constructions and numbers*, New York Journal of Mathematics **6** (2000) 119–133, dostopno na <https://nyjm.albany.edu/j/2000/6-8.pdf>.
- [2] Row, T. S., *Geometric exercises in paper folding* (ur. W. W. Beman in D. E. Smith), The Open Court Publishing Company, 1917.
- [3] Struik, D. J., *Kratka zgodovina matematike* (ur. C. Velkovrh), prev. T. Bohte, Društvo matematikov, fizikov in astronomov SR Slovenije, Ljubljana, 1986.
- [4] Burnside, W., *On groups of order $p^\alpha q^\beta$* , Proceedings of the London Mathematical Society **s2-1**(1) (1904) 388–392, dostopno na <https://doi.org/10.1112/plms/s2-1.1.388>.
- [5] Cox, D. A. in Shurman, J., *Geometry and number theory on clovers*, The American Mathematical Monthly **112**(8) (2005) 682–704, dostopno na <https://doi.org/10.1080/00029890.2005.11920241>.
- [6] Edwards, B. C. in Shurman, J., *Folding quartic roots*, Mathematics Magazine **74**(1) (2001) 19–25.
- [7] Fathi, A., Mobadersany, P. in Fathi, R., *A simple method to solve quartic equations*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences **6**(6) (2012) 331–336.
- [8] Faucette, W. M., *A geometric interpretation of the solution of the general quartic polynomial*, The American Mathematical Monthly **103**(1) (1996) 51–57, dostopno na <http://www.jstor.org/stable/2975214>.
- [9] Fujimura, M. in dr. *The ptolemy-alhazen problem and spherical mirror reflection*, Computational Methods and Function Theory **19** (2019) 135–155, dostopno na <https://link.springer.com/article/10.1007/s40315-018-0257-z#citeas>.
- [10] Geretschläger, R., *Euclidean constructions and the geometry of origami*, Mathematics Magazine **68**(5) (1995) 357–371, dostopno na <http://www.jstor.org/stable/2690924>.
- [11] Gorjup, R., *Alhazen*, diplomsko delo, 2014, dostopno na http://pefprints.pef.uni-lj.si/2018/1/Diplomsko_delo_Rok_Gorjup.pdf.
- [12] Grahor, A. in dr. *ORIGAMIKA: Matematično raziskovanje enakostraničnega trikotnika s prepogibanjem papirja*, raziskovalna naloga, 2016.
- [13] Haga, K., *Origamics: mathematical explorations through paper folding*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008.
- [14] Hatori, K., *Origami Construccions*, 2003, dostopno na <https://origami.ousaan.com/library/conste.html>.
- [15] Heath, T., *A history of greek mathematics (volume 1)*, Oxford University Press, 1921, dostopno na <https://www.wilbourhall.org/pdfs/heath/heathvol1.pdf>.

- [16] Heath, T. L., *The thirteen books of euclid's elements, Vol. 1 (books i and ii)*, Dover Publications, Inc., 1956.
- [17] Hull, T., *Folding regular heptagons*, v: 2009, str. 181–191, DOI: 10 . 1201 / b10580-22.
- [18] Alperin, R. C., *Mathematical origami: another view of alhazen s optical problem*, Origami³: Third International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education (2002) 83–93 (ur. T. Hull), dostopno na <https://anyflip.com/zpwaj/ujus/basic>.
- [19] Scimemi, B., *Paper-folding constructions in euclidean geometry: an exercise in thrift*, Origami³: Third International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education (2002) 107–117 (ur. T. Hull), dostopno na <https://anyflip.com/zpwaj/ujus/basic>.
- [20] Hull, T. C., *Origametry: mathematical methods in paper folding*, Cambridge University Press, 2020.
- [21] Hull, T. C., *Project origami: activities for exploring matmehatics – second edition*, Taylor & Francis Group, 2013.
- [22] Hull, T. C., *Solving cubics with creases: the work of beloch and lill*, The American Mathematical Monthly **118**(4) (2011) 307–315.
- [23] Hungerbühler, N., *Geometrical aspects of the circular billiard problem*. Elemente der Mathematik **47**(3) (1992) 114–117, dostopno na <http://eudml.org/doc/141533>.
- [24] Hvidsten, M., *Geometry with geometry explorer*, The McGraw-Hill Companies, Inc, 2005.
- [25] Jerman, M., *O konstrukcijah z ravnilom in šestilom*, Obzornik za matematiko in fiziko **3**(45) (1998) 73–78.
- [26] Johnson, D., *Paper folding for the mathematics class*, National Council of Teachers of Mathematics, 1957.
- [27] Lang, R. J., *British origami*, Four Problems **132**(3) (1988) 7–11.
- [28] Lang, R. J., *Origami and Geometric Constructions*, 2013, dostopno na https://langorigami.com/wp-content/uploads/2015/09/origami_constructions.pdf. ■■■
- [29] Lavrič, P., *Hagovi izreki za srebrne pravokotnike*, diplomsko delo, 2013, dostopno na http://pefprints.pef.uni-lj.si/1534/1/Hagovi_izreki_za_srebrne_pravokotnike_PetraLavric.pdf.
- [30] Lill, E., *Résolution graphique des équations numériques d'un degré quelconque à une inconnue*, Nouvelles Annales de Mathématiques **6**(2) (1867) 359–362.
- [31] Lotka, A. J., *Construction of conic sections by paper-folding*, School Science and Mathematics **7**(7) (1907) 595–597.

- [32] Martin, G. E., *Geometric constructions*, Springer New York, 1997.
- [33] Messer, P., *Problem 1054*, Crux Mathematicorum **12**(10) (1986) 284–285, dostopno na https://cms.math.ca/wp-content/uploads/crux-pdfs/Crux_v12n10_Dec.pdf.
- [34] Mrinal, M., *Galois theory and the abel-ruffini theorem*, v: 2019, dostopno na <https://math.uchicago.edu/~may/REU2019/REUPapers/Mrinal.pdf>.
- [35] Nishimura, Y., *Solving alhazen's problem by origami*, International Journal of Geometry **7**(2) (2018) 37–42.
- [36] Robinson, N., *History of origami*, 2024, dostopno na <https://www.britannica.com/art/origami/History-of-origami>.
- [37] Royster, D. C., *Chapter 3: Euclidean Constructions*, Zapiski predavanj, 2002, dostopno na <https://www.ms.uky.edu/~droyster/courses/spring02/classnotes/chapter03.pdf>.
- [38] Smith, S. G., *Paper folding and conic sections*, The Mathematics Teachers **96**(3) (2003) 202–207.
- [39] Šivic, K., *Kvadratni funkcionali*, Dostopno na spletni učilnici FMF na https://ucilnica1920.fmf.uni-lj.si/pluginfile.php/72996/mod_resource/content/1/kvadratne_forme.pdf, Zapiski predavanj pri predmetu Algebra 1, 2020.
- [40] Terglav, G., *Konfiguracija 95 točk in 95 premic, ki izhaja iz Pascalovega izreka in posplošitve na višje rede*, delo diplomskega seminarja, 2022, dostopno na <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=159263&lang=slv>.
- [41] Videla, C. R., *On points constructible from conics*, The Mathematical Intelligencer **19**(2) (1997).
- [42] Wikipedia contributors, *Alhazen's problem – Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2025, dostopno na https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Alhazen%27s_problem&oldid=1267024991.
- [43] Wikipedia contributors, *Envelope (mathematics) – Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024, dostopno na [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Envelope_\(mathematics\)&oldid=1223619712](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Envelope_(mathematics)&oldid=1223619712).
- [44] Wikipedia contributors, *Quartic equation – Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2024, dostopno na https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quartic_equation&oldid=1262196167.
- [45] Wilk, S. R., *Alhazen's problem*, 2015, dostopno na <https://blog.oup.com/2015/03/alhazens-problem-optics-light/>.
- [46] Zore, T., *Origami geometrija*, magistrsko delo, 2022, dostopno na http://pefprints.pef.uni-lj.si/7209/1/Origami_geometrija_-_Tja%C5%A1a_Zore.pdf.