

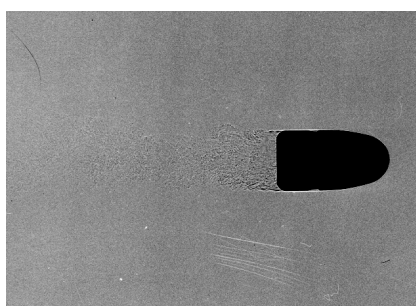
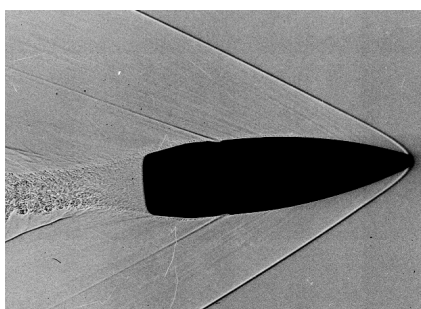
Balistiek

De bewegingen van de kogel met/om zijn lengteas

Het stromingsveld

Foto's hebben aangetoond dat het stromingsveld van de lucht in de directe omgeving van een kogel bestaat uit laminaire en turbulente stromingen. Het stromingsveld is vooral afhankelijk van de snelheid waarmee de kogel zich verplaatst, de vorm van de kogel en de ruwheid van het oppervlak. Het stromingsveld verandert zeer sterk zodra de kogelsnelheid tot beneden de geluidssnelheid daalt, ca. 340m/s (1115ft/s) in een standaard atmosfeer.

De linker foto toont een .308 Winchester (7.62x51 NATO) FMJ kogel die zich verplaatst met ongeveer 850m/s (2800ft/s). Je kunt duidelijk drie verschillende schokgolven onderscheiden. De eerste en meest intensieve schokgolf ontstaat bij de punt van de kogel en wordt de Mach Conus genoemd. Een tweede schokgolf ontstaat ter plaatse van de krimpgroef en de derde schokgolf wordt gevormd aan de achterkant van de kogel. Bovendien is achter de kogel een sterk turbulente stroming zichtbaar. De stroming over het oppervlak van de kogel verandert van een laminaire grenslaag rond de voorste helft van de kogel (gekaracteriseerd door parallelle stroomlijnen) tot een turbulente stroom (gekaracteriseerd door wervelingen) beginnend vanaf de krimpgroef.

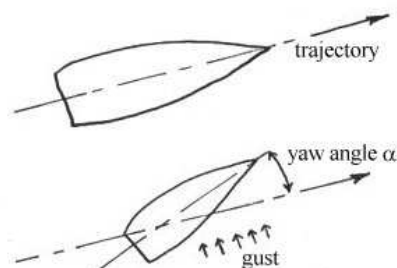
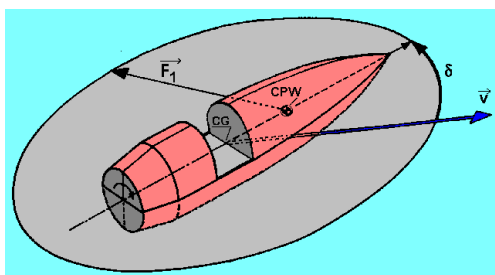


De rechter foto toont een .32ACP pistool kogel die aanzienlijk langzamer dan de geluidssnelheid voortbeweegt. Er zijn geen schokgolven aanwezig. Het enige wat overblijft, is de turbulentie achter de kogel.

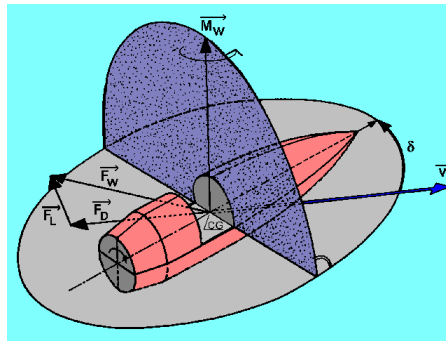
Het stromingsveld veroorzaakt een aantal krachten en momenten die op de kogel inwerken. Een aantal van deze krachten worden veroorzaakt door massa en grijpen aan op het statische zwaartepunt van de kogel. Ze zijn afhankelijk van de totale massa en de verdeling van deze massa over de kogel. Een tweede groep van krachten zijn de aërodynamische krachten. Ze ontstaan door de inwerking van het stromingsveld op de kogel en worden bepaald door de vorm en oppervlakte ruwheid van de kogel. Sommige aërodynamische krachten zijn afhankelijk van rotatie, sliphoek (yaw angle) van de kogel of van beiden.

Sliphoek δ (yaw angle)

Met de sliphoek δ wordt bedoeld dat de richting waarin de hartlijn van de kogel wijst afwijkt van de bewegingsrichting van het zwaartepunt van de kogel. Ontelbare experimenten hebben aangetoond dat een sliphoek, wanneer de kogel de loopmondung verlaat, niet te voorkomen is en wordt veroorzaakt door verstoringen als loopvibraties en uit de loopmondung stromende verbrandingsgassen die tegen of langs het oppervlak van de kogel stromen. De kogel verlaat de loopmondung en heeft daarbij een rotatiesnelheid ("spin") van circa 50000 omwentelingen per minuut. Bovendien bevindt zich een drukgolf, een laag van samengeperste lucht, aan de voorzijde van de kogel. De drukverschillen op het oppervlak van de kogel resulteren in een kracht – dwarswindkracht genoemd - die aangrijpt op het drukpunt van de wind *CPW* (Center of Pressure Windforce), welke bij een door rotatie gestabiliseerde kogel vóór het statische zwaartepunt *CG* (Center of Gravity) van de kogel aangrijpt. Het *CPW* aangrijpingspunt is echter niet stationair maar verplaatst zich als het stromingsveld rond de kogel verandert. Het figuur toont schematisch de dwarswindkracht F_1 die aangrijpt op het *CPW*.



Door het neigen van de kogel treedt het Kantelmoment M_w (ook wel Overturning Moment genoemd) op.

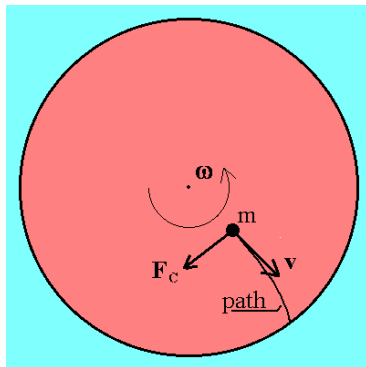


Het is duidelijk dat het Kantelmoment de sliphoeck alleen maar vergroot, en men zou verwachten dat de kogel begint te tuimelen en onstabiel wordt. Dit gebeurt inderdaad wanneer de kogel wordt afgevuurd door een loop zonder trekken en velden. We zullen nu echter beschouwen wat er gebeurt bij roterende kogels en het daarbij optredende gyroscopische effect.

Middelpuntvliedende kracht, Coriolis kracht en het gyroscopische effect (precessie)

Middelpuntvliedende kracht (centrifugale kracht) is de kracht die lijkt te werken op voorwerpen die een gekromde baan volgen. Een voorwerp dat bijvoorbeeld aan een touwtje wordt rondgeslingerd lijkt aan het touwtje te trekken: van uit het midden naar buiten, dus middelpuntvliedend of "vluchtend".

Zonder touwtje zou het hierboven genoemde voorwerp ongehinderd rechtdoor vliegen. Het touwtje trekt het naar het middelpunt toe. Om de snelheid en richting van een voorwerp te veranderen - dus bij het maken van een bocht - is een kracht nodig: de coriolis kracht.

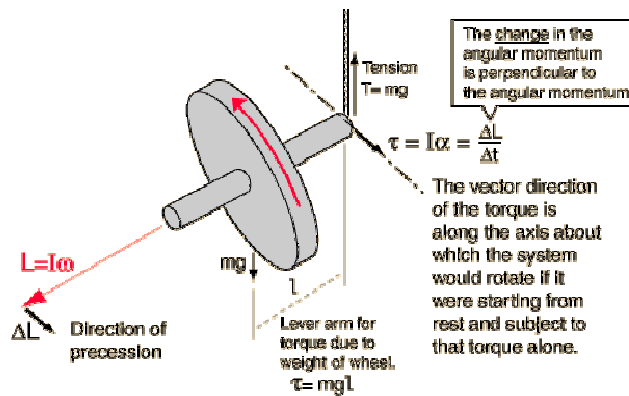


Stel je een schijf voor die met constante snelheid ronddraait en waarbij een massa m zich vanuit het centrum met een constante snelheid v naar de rand beweegt. Iemand die op de schijf stond zou de massa in een gekromde lijn vanuit het centrum naar de rand zien bewegen. De massa is beïnvloed door een kracht F_c die haaks op de bewegingsrichting van de massa werkt. Deze kracht wordt de Coriolis kracht genoemd. Er ontstaat een interessant traagheidsmoment dat te maken heeft met de rotatie van de schijf. Iedere keer als er een kracht wordt uitgeoefend op een roterend object, zal het object reageren door 90 graden af te wijken van de richting waarin de kracht werkt. Probeer dit maar eens met een tol. Laat hem rechtersom draaien en duw de bovenkant van je af. De tol reageert door naar rechts te kantelen.

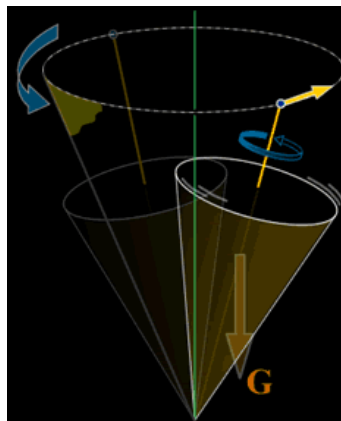
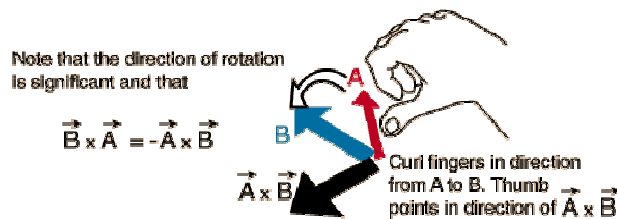
Precessie is echt een cool verschijnsel. Een boomerang keert terug door precessie, een gyroscoop, een tol maar ook kogels werken door precessie. Precessie wordt vaak omschreven als "de neiging van een -om een as draaiend- voorwerp om in hetzelfde vlak te blijven ronddraaien." Of: "De as van het ronddraaiende voorwerp wil in dezelfde oriëntatie blijven": het behoud van impulsmoment, of hoekmoment, of draaimoment (conservation of angular momentum).

Precessie kun je beschouwen als het wentelen van het zwaartepunt van een kogel om de baan die hij aflegt. Het veroorzaakt een baan die de vorm van een kurketrekker heeft. Zolang de massa van de kogel volledig symmetrisch is, is de kogel tijdens zijn rotatie in evenwicht; de krachten zijn in alle richtingen gelijk en heffen elkaar op. Is er echter een onbalans in de symmetrie of concentriciteit van de kogel omdat het zwaartepunt uit het centrum ligt dan zal, als gevolg van de middelpuntvliedende kracht, de zijde met de grootste massa zich van het centrum willen weg bewegen. Hetzelfde gebeurt als de kamer niet perfect in het verlengde van de loop ligt of de loop zelf een 'kurketrekker' vorm heeft.

Doordat het roterende voorwerp ronddraait om zijn eigen as, heeft het een zogenaamd draaimoment of hoekmoment (L). In het engels heet een draaimoment (of hoekmoment), angular momentum.

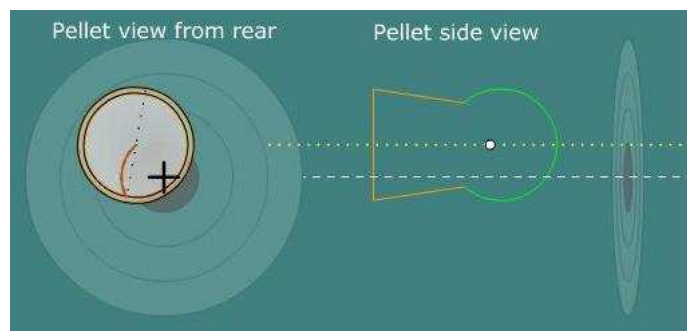


De richting van het totaal van de vectoren kan je zichtbaar maken als de 'rechterhand-regel'. Als je de vingers van je rechterhand kromt zodat ze de rotatie vector A volgen naar B, zal je duim in de richting van het totaal van de vectoren wijzen.



Precessie

De totale uitkomst van het gyroscopisch effect is dat het zwaartepunt van de kogel al bij de kleinste afwijking in symmetrie als een tol over een kegelvormig oppervlak om de bewegingsrichting van de kogel gaat roteren. Het veroorzaakt een baan die de vorm van een kurketrekker heeft. Deze beweging wordt de langzame oscillatie (Slow Oscillation) of Precessie genoemd.



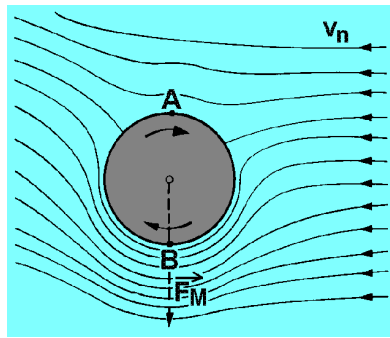
Precessie – het zwaartepunt van de kogel wentelt met een kurketrekkervormige beweging om zijn vluchtbaan.

Om zaken nog ingewikkelder te maken werkt er bovenop de langzame oscillatie ook nog een snelle oscillatie op de kogel.

Het Magnus effect (nutatie)

De dwarswindkracht is normaal gesproken de grootste aërodynamische kracht die op de kogel werkt. Er zijn echter andere, kleinere krachten die heel belangrijk zijn voor de stabiliteit van de kogel.

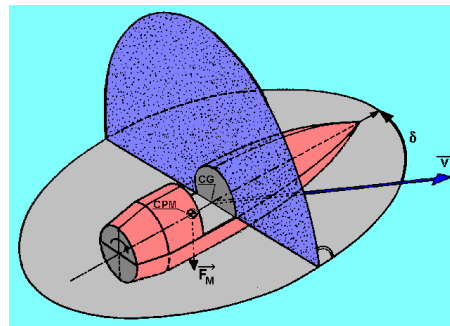
Nutatie kan beschouwd worden als een wiebelen van de kogel. Wanneer je nutatie bij een tol bekijkt, is het centerpunt gefixeerd en beweegt de top van de tol in een baan om het centerpunt (waar het contact maakt met het oppervlak waar de tol op steunt). Bij een kogel besraat echter geen vast punt en wiebelt hij rond het statische zwaartepunt van de kogel.



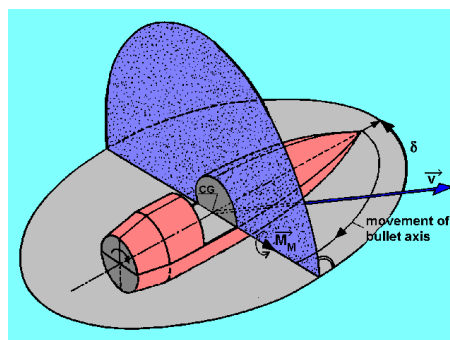
In het bovenstaand figuur bekijken we een kogel vanaf de achterzijde. Er wordt aangenomen dat de kogel een rotatie rechtsom heeft, aangegeven door de twee pijlen. Bovendien heeft de kogel een sliphoek δ die naar links gericht is, zodat de langsas van de kogel naar links wijst. Daardoor ontstaat een dwars gerichte snelheidscomponent V_n ten opzichte van de lengteas van de kogel.

Door de rotatie en de oppervlakteweerstand van de kogel blijven luchtdeeltjes aan het oppervlak kleven en wordt het stromingsveld rond de kogel asymmetrisch. De snelheid van de luchtstroom en de rotatiesnelheid moeten afgetrokken worden op punt A en wordt opgeteld worden op punt B. Volgens de wet van Bernoulli veroorzaakt dit een drukverschil. Een hogere druk op punt A en een lagere druk op punt B, waardoor op punt B een omlaag gerichte kracht F_m (Magnus Force) ontstaat. Dit verklaart waarom de Magnus kracht alleen kan ontstaan als er een rotatie én sliphoek bestaat.

Het aangrijpingspunt van de Magnuskracht kan achter maar ook voor het zwaartepunt van de kogel liggen en wordt bepaald door het stromingsveld. De Magnuskracht is veel kleiner dan de dwarswindkracht, maar is van groot belang voor de stabiliteit van de kogel.



De stappen die we genomen hebben om de windkracht te bepalen kunnen we nu ook toepassen. We kunnen de Magnus kracht en zijn aangrijpingspunt CP vervangen door een gelijkwaardige kracht die aangrijpt op het zwaartepunt van de kogel én een moment M_m (het Magnus moment). Dit moment veroorzaakt een kanteling van de kogel om een as die haaks op de lengteas van de kogel staat, zoals in onderstaand figuur.

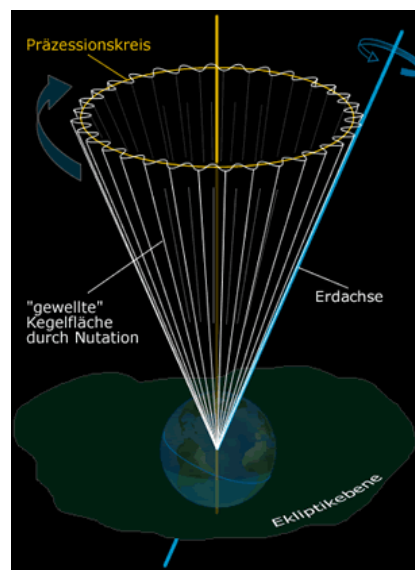
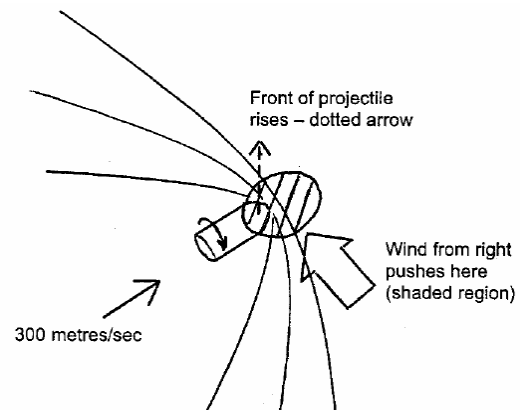
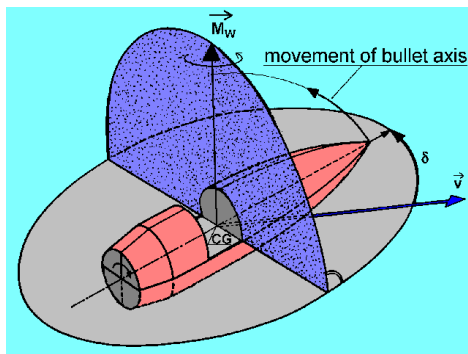


Ook nu geldt het gyroscopische effect voor de Magnus kracht. Door het gyroscopische effect is de voorkant van de kogel in de richting van het bijbehorende moment M_m (Magnus moment) gedraaid. Teruggrijpend op het figuur blijkt dat de Magnus kracht een stabiliserend en dempend effect op de sliphoek van de kogel heeft, omdat het de sliphoek δ (angle of yaw) vermindert. De lengteas van de kogel wordt namelijk in tegengestelde richting van de sliphoek gedraaid.

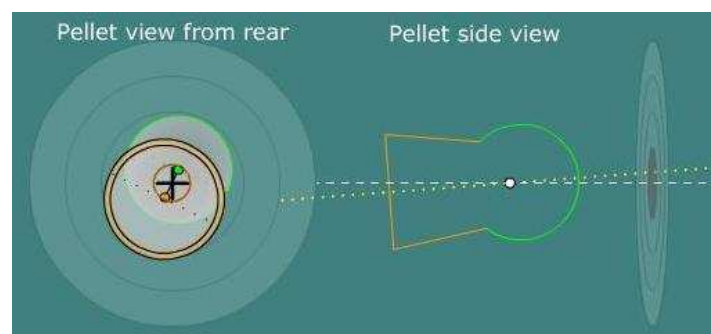
Op gelijke wijze veroorzaakt de Magnus kracht een destabiliserend effect en een vergroting van de sliphoek δ wanneer het aangrijpingspunt vóór het zwaartepunt van de kogel ligt.

Het Magnus moment laat de kogel om een as, door het zwaartepunt van de kogel en haaks op het weerstandsvlak, kantelen. Het weerstandsvlak wordt gevormd door de bewegingsvector V en de lengteas van de kogel. Wanneer de kogel geen rotatie zou hebben, zou de sliphoek δ steeds groter worden, en de kogel gaan buitelen.

Als de kogel echter genoeg rotatie heeft treedt het gyroscopische effect op en verplaatst de lengteas van de kogel zich in de richting van het Kantelmoment M_w (Overturning moment), haaks op de richting van de weerstand. De verplaatsing van de lengteas van de kogel verandert nu de stand van het weerstandsvlak.



Nutatie



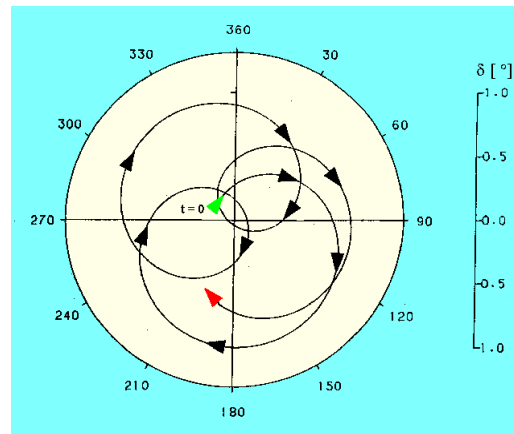
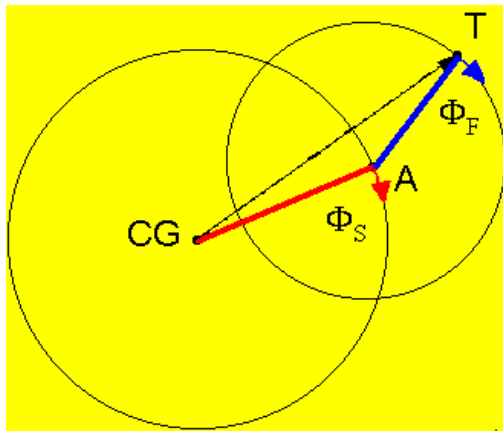
Nutatie – de lengteas van de kogel wiebelt om het zwaartepunt van de kogel.

Het twee-armig model (precessie + nutatie)

De slingerende beweging van een door rotatiegestabiliseerde kogel kan beschreven worden als een optelling van een snelle en een langzame oscillatie, samengevat in een twee-armig model.

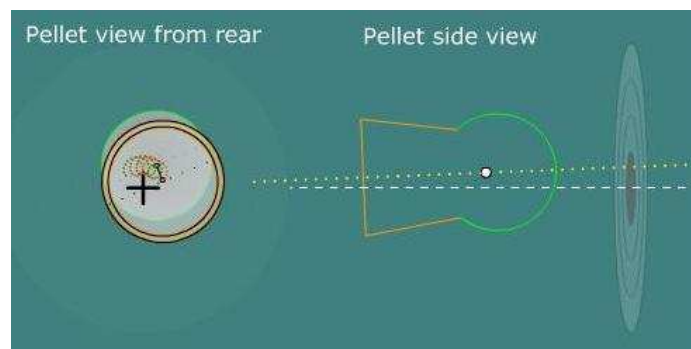
Stel je voor dat je vanaf de achterkant naar een kogel kijkt. De arm van de langzame oscillatie of precessie (CG tot A) roteert om het zwaartepunt van de kogel. Punt A maakt daarbij een cirkelvormige beweging om het zwaartepunt.

De arm van de snelle oscillatie of nutatie (A tot T) roteert met een snelle oscillatie. Daardoor draait T in een cirkelvormige beweging om het punt A. T is de punt van de kogel en CG tot punt T is de lengteas van de kogel. Dit model beschrijft de kurkentrekker beweging die de lengteas van de kogel beschrijft.

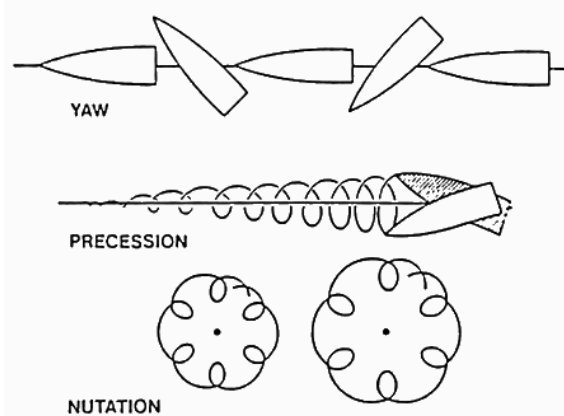


De punt van de kogel beweegt over een spiraalvormig pad, terwijl het zwaartepunt in het centrum van de cirkel blijft. Regelmatig keert de punt van de kogel terug richting het centrum van de cirkel. Op dat moment wordt de sliphoeek of yaw angle minimaal. Bij het verlaten van de loopmondning ($t=0$) is de sliphoeek zeer klein, maar wordt groter tot een maximum van circa 1 graad. Daarna vermindert de sliphoeek tot bijna nul. De maximale sliphoeek vermindert naarmate de kogel zich voortbeweegt. De kogel in deze grafiek wordt dan ook als stabiel beschouwd.

Het uiteindelijke bewegingsbeeld van precessie en nutatie ziet er ongeveer als onderstaande plaatjes uit:



Precessie & Nutatie - de kogel wentelt in een kurkentrekker beweging om zijn vluchtbaan en de lengteas van de kogel wiebelt in een conus-vormige beweging om het zwaartepunt van de kogel.



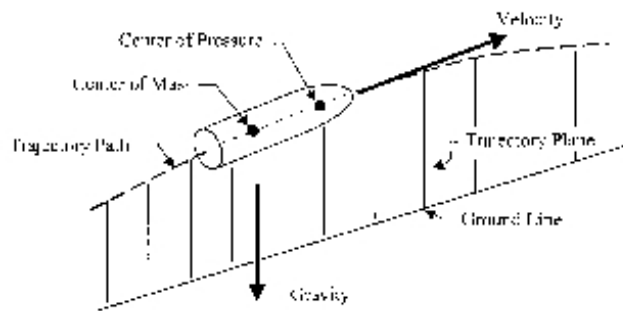
Sliphoeek in evenwicht (yaw of repose) en de resulterende zijdelingse verplaatsing

Laten we nu een stabiele kogel bekijken die een langere afstand heeft afgelegd, een rotatie rechtsonder heeft en de tijdelijk aanwezige sliphoeek als gevolg van de inwerking van de loopvibraties en mondinggassen gedempt is, zodat hij gyroscopisch en dynamisch stabiel voortbeweegt.

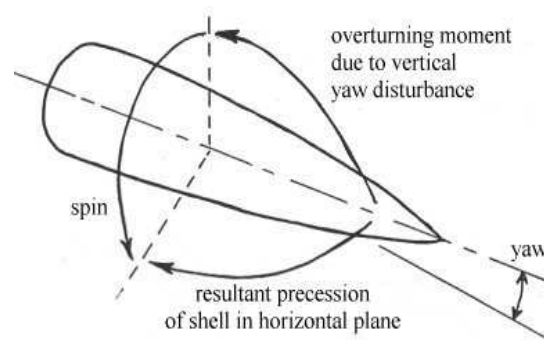
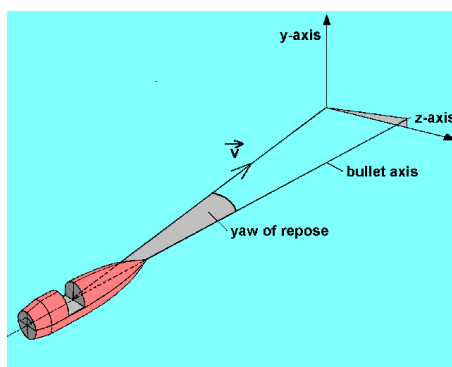
Er ontstaat een interessant traagheidsmoment dat te maken heeft met de rotatie van de kogel. Iedere keer als er een kracht wordt uitgeoefend op een roterend object, zal het reageren door 90 graden af te wijken van de richting waarin de kracht werkt. Probeer dit maar eens met een tol. Laat hem rechtsonder draaien en duw de bovenkant van je af. De tol reageert door naar rechts te kantelen.

Een kogel zal, net als een afgeschoten pijl of een boot die de stroming van een rivier kruist, als een windvaan reageren en zijn voorkant in de richting van de 'wind' draaien. Bij het verlaten van de loopmondning begint de kogel met zijn rotatie as in lijn met zijn bewegingsrichting en de voortbewegingsnelheid ligt exact in het verlengde van de hartlijn van de kogel. De snelheidsvector V (Velocity) ligt in het verplaatsingsvlak en werkt tangentiaal op de verplaatsingsrichting van de kogel. De aërodynamische weerstandskracht F_w werkt precies in lijn maar tegengesteld aan de snelheidsvector. De kracht in de

lengterichting van de kogel is de luchtweerstand die de kogel ondervindt. De luchtweerstand werkt op zowel het zwaartepunt als het drukpunt van de wind en veroorzaakt daarom geen moment. Echter, de zwaartekracht veroorzaakt direct na het verlaten van de loopmondning voor een parabol vormige verplaatsing omlaag.



De kogel heeft daardoor in het verticale vlak dus een kleine sliphoek (yaw angle) - de kleine hoek tussen het draaimoment L en de snelheidsvector V . Omdat het aangrijpingspunt van de windkracht vóór het statische zwaartepunt van de kogel ligt, reageert de kogel als een windvaan en wil de voorkant naar onderen laten draaien – kantelmoment M_w . Door het naar onderen gerichte moment reageert de kogel als een tol door de punt naar recht te draaien. Door het naar rechts optredende moment reageert de kogel tevens door, weer net als de tol, de voorkant iets omhoog te laten draaien. De lengteas van de kogel wijst daardoor naar rechts en iets omhoog ten opzichte van de bewegingsrichting van het zwaartepunt van de kogel. Deze hoek is normaal gesproken slechts een fractie van één graad.



Als gevolg van deze kleine neiging bestaat er een kleine maar constante zijwind welke de neiging heeft de kogel naar rechts te laten afwijken en is de reden voor de zijdelingse afwijking of 'gyroscopic drift' van rotatie gestabiliseerde kogels.

De grootte van het draaimoment van de kogel blijft nagenoeg constant gedurende de vlucht van de kogel. Hij vermindert maar heel langzaam omdat de luchtweerstand door rotatie en het moment dat op de kogel werkt, zeer klein zijn. Daardoor is de verandering van het draaimoment van de kogel beperkt tot een verandering in de richting van het draaimoment L . Dit bepaalt dat het draaimoment L naar het kantelmoment M_w toedraait. Als gevolg hiervan is het draaimoment L , die altijd in de lengterichting van de kogel werkt, omlaag gericht in de richting van het kantelmoment M_w dat door de sliphoek (yaw angle) opgewekt wordt. Dus eigenlijk zorgt de sliphoek ervoor dat de kogel langzaam voorover kantelt in de verplaatsingsrichting, om de hartlijn van de kogel bijna precies tangenciaal aan de parabol vormige verplaatsingsrichting te houden. Terwijl de lengteas van de kogel en het draaimoment L omlaag roteren, roteert het kantelmoment M_w met bijna dezelfde mate, zodat het draaimoment L altijd haaks op M_w blijft werken. Deze situatie is een 'steady state' beweging; alles verandert langzaam naarmate de kogel verder vliegt. De sliphoek, het draaimoment, het kantelmoment en de zijdelingse kracht zijn nagenoeg, maar niet helemaal, constant terwijl de kogel van de loopmondning naar de schijf vliegt.

Zijdelingse afwijking treedt ook op voor kogels met een rotatie linksom (tegen de klok in), maar de afwijking is dan naar links. Bij een linksom roterende kogel is het draaimoment gericht naar de achterkant van de kogel. Om de kogel voorover te laten kantelen in zijn bewegingsrichting is een omhoog gerichte vertikaal moment nodig zodat het draaimoment omhoog wil roteren. Dit vraagt weer om een zijdelingse kracht die van rechts naar links op het bewegingsvlak werkt, en dit kan alleen maar resulteren uit een sliphoek naar links ten opzichte van het bewegingsvlak, een kleine 'kogelpunt naar links' gerichte hoek van de kogel. Het resultaat is een zijdelingse luchtweerstand naar links en de kogel wijkt af naar links.

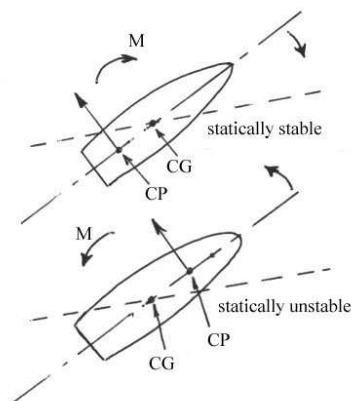
Het rotatie depend moment

Wrijvingsweerstand over de oppervlakte van de kogel vermindert de roterende snelheid. De roterende snelheid wordt echter minder snel vertraagd als de voortbewegingsnelheid. Dit is de reden dat een kogel, die bij het verlaten van de loopmondning gyroscopisch stabiel is, ook stabiel blijft over de resterende afstand.

Het uiteindelijke resultaat is een afnemende kracht op de voorzijde van de kogel, en die kracht wordt overwonnen door een naar verhouding groter wordende rotatiesnelheid vergeleken met de voorwaartse snelheid. Naarmate de kogel verder van het geweer verwijderd is zal de stabiliteit toenemen. De enige uitzondering is wanneer de kogel de geluidsgrens passeert. Bij deze snelheid, circa 340m/s, kan de kogel onstabiel worden.

Dynamisch stabiele kogels

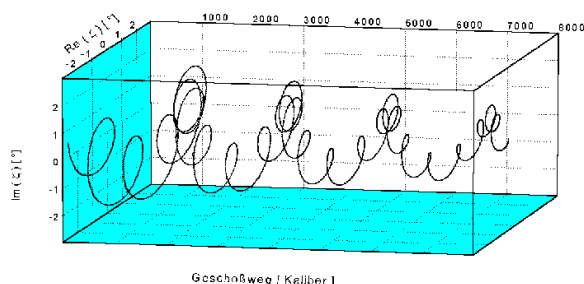
Een kogel wordt als dynamisch stabiel beschouwd wanneer de sliphoek (yaw angle) gedurende de vlucht wordt gedempt, met andere woorden, als de sliphoek afneemt. Een kogel is dynamisch onstabiel als de sliphoek toeneemt.



Stabiele kogel (boven) en onstabiele kogel (onder)

Onderstaand figuur toont een standaard M80 kogel (7.62 x 51 Nato). De beweging van de kogelpunt is erg gecompliceerd, maar vertoont nog steeds een symmetrisch en herhalend patroon.

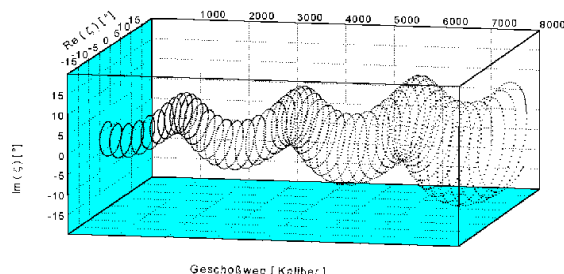
Het figuur toont de beweging van de punt van de kogel vanaf het moment dat deze de loopmondung verlaat, tot een afstand van 8000 kalibers, ongeveer 45 meter. Het zwaartepunt van de kogel beweegt in een rechte lijn door de 'doos' en de kurkentrekker vormige lijn is de kogelpunt. De maximale sliphoek wordt gedempt naarmate de kogel zich verder verplaatst. Na enkele duizenden kalibers, afhankelijk van de dempingwaarde is de sliphoek gereduceerd tot bijna nul.



Tot dus ver hebben we te maken gehad met kogels die een goede stabiliteit bezaten met een stabiliteitsfactor tussen 1.1 en 2.0 De sliphoek wordt in alle gevallen gedempt.

Dynamisch onstabiele kogels

Onderstaand figuur toont de beweging van een .38 Special Wadcutter kogel, afgevuurd uit een revolver. De kogel is statisch stabiel met een stabiliteitsfactor van 4.0 wat betekent dat hij zelfs te veel rotatie bezit. Zichtbaar is dat de kogel dynamisch onstabiel is omdat de langzame oscillatie steeds meer toeneemt. De maximale sliphoek vergroot zich ongeveer drievoudig, van vijf graden bij de loopmondung tot 15 graden na een afstand van 8000 kalibers (73 meter).



Rotatie en de Stabiliteitsfactor (Greenhill formule)

Wat betekent al het voorafgaande voor de wedstrijdsschutter?

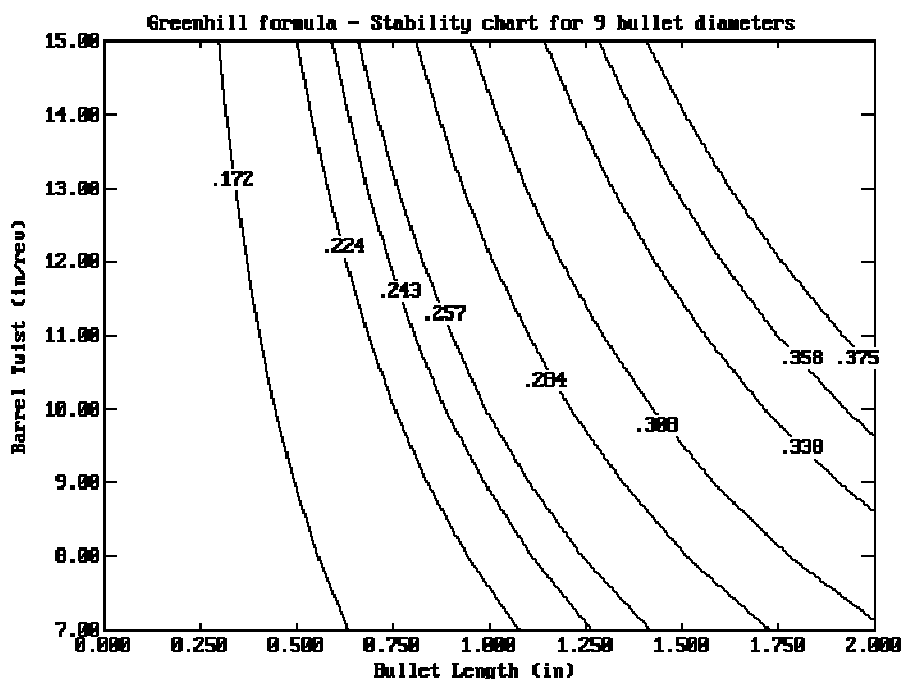
Als een kogel door een gladde loop wordt afgevuurd, zal er door de lucht een kracht op de voorzijde van de kogel uitgeoefend worden, welke de kogel zal laten kantelen waardoor de kogelbaan onberekenbaar wild en wordt. Om dit te voorkomen katen we de kogel om zijn lengteas roteren. De mate van rotatie wordt bepaald door het soortelijk gewicht, de vorm en constructie van de kogel, kogelsnelheid en de dichtheid van de lucht waardoor de kogel moet gaan.

De ballistici hebben een manier ontwikkeld om de stabiliteit te meten, bekend als de stabiliteitsfactor, of Greenhill formule. Een waarde van 1.0 betekent dat de kogel nog maar net stabiel is. Wanneer de waarde lager dan 1.0 wordt, is de kogel onstabiel; hij tuimelt en heeft geen enkele trefzekerheid.

De Greenhill formule (matan in inches):

$$\text{Rotatie} = 150 \times \text{Dia}^2 / \text{Lengte}$$

De formule wordt gebruikt om te berekenen wat de minimaal benodigde rotatie van een kogel met een bepaalde diameter en lengte moet zijn om deze te stabiliseren. Het is een redelijk betrouwbare methode voor kogels met een gematigde snelheid. Kogels met een hogere snelheid blijken al stabiel te zijn bij een iets lagere rotatiesnelheid dan de formule aangeeft. Kies in het onderstaande diagram de diameter van je kogel. Als de kogel lengte en de spoed van de trekken en velden in de loop op of links van de lijn liggen, behoort de kogel stabiel te zijn.



Het is duidelijk dat de stabiliteitsfactor boven 1.0 moet liggen. Er is bepaald dat een stabiliteitsfactor van 1.2 of 1.3 de minimale waarde voor een betrouwbare stabiliteit is. Een grotere stabiliteitsfactor veroorzaakt een grotere sliphoek (yaw angle) wat tot gevolg heeft dat de demping van de sliphoek langer duurt en de dwarswindkracht op de kogel langer duurt en groter is, wat een groter snelheidsverlies over langere afstand met zich meebrengt. Bij een minimale dwarswindkracht (sliphoek) gebeurt het omgekeerde en is een kogel om dezelfde reden dus ook minder gevoelig voor (zij)wind. Naarmate het niveau van stabiliteit zakt, kan iedere kleine verandering in de combinatie geweer-kogel een afzwaaijer veroorzaken. Bijvoorbeeld een beschadigde loopmondning kan de kogel een overmatige yaw angle geven die niet meer te stabiliseren is. Ook een overmatig vervuilde loop en monding kunnen dit probleem en een onstabiele kogel veroorzaken.

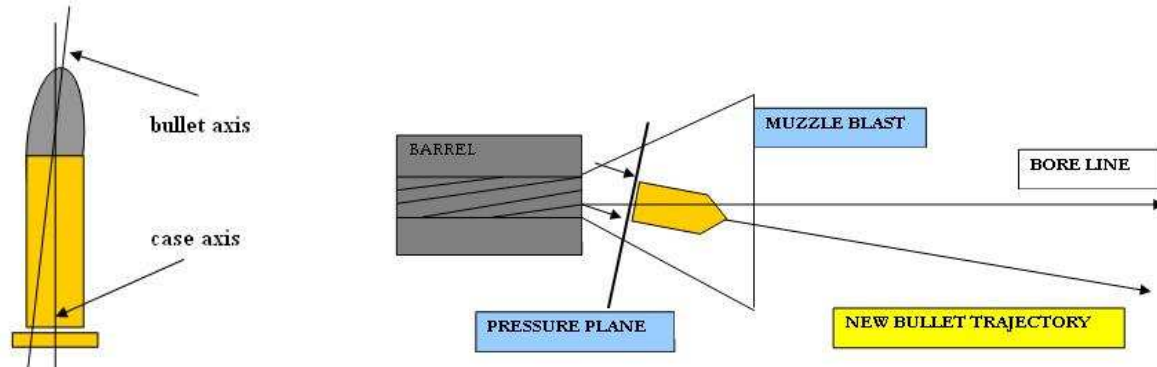
De loopmondning

Terwijl de kogel zich door de loop verplaatst, kan hij alleen maar recht vooruit bewegen. Op het moment dat de kogel de loopmondning (het vlak gevormd door de voorkant van de loop) verlaat, behoort de "kroon" (de uiterste rand van de binnenzijde van de loop aan het uiteinde van de loop) de achterkant van de kogel precies gelijk te omvatten. In het ideale geval verliest de gehele omtrek van de loopmondning het contact met de achterkant van de kogel op hetzelfde moment, zodat de kogel niet naar een kant wordt weg gekanteld. Het kantelen van de kogel veroorzaakt een wiebelen van de kogel en een vergroting van het oppervlak van de kogel dat de luchtweerstand veroorzaakt. In feite vergroot de wiebelende kogel zijn diameter of kaliber, waardoor een grotere luchtweerstand optreedt. Daardoor verliest de kogel meer snelheid dan dat hij stabiel vooruit beweegt en verandert het trefpunt. Bij veel geweren bevat de kroon een vernauwing ("button choked") zodat de loop de achterkant van de kogel precies gelijkmatig en volledig omvat bij het verlaten van de loop. Zorg ervoor dat de kroon van de loop dus onbeschadigd blijft.

Uniformiteit

Rotatie van de kogel voorkomt het buitelen van de kogel. Wanneer de kogel niet meer in balans is zal de centrifugale kracht (precessie) de kogel van zijn baan gaan afwijken, zodra hij de loopmondning verlaat. De richting van de afwijking zal bij ieder schot afzonderlijk afhangen van de richting waarin het grootste deel van de massa heen gericht was, op het moment dat het voorste geleidpunt van de kogel de loopmondning verlaat.

Concentriciteit



Een natuurkundige wet bepaalt dat een (gas)druk alleen haaks op een oppervlak kan werken. Wanneer de kogel of de gehele patroon scheef in de kamer wordt geplaatst en de hartlijn van de kogel, op het moment dat deze de loopmondning verlaat, niet in het verlengde van de hartlijn van de loop staat, maakt de hartlijn van de kogel een hoek ten opzichte van de hartlijn van de loop en dus de achterzijde van de kogel een hoek ten opzichte van het oppervlak van de loopmondning; de sliphoek of yaw angle. Op dat moment werkt er nog een hoge gasdruk op de achterkant van de kogel (345 – 1034 bar). Als gevolg van de gassen die tegen de achterkant van de kogel duwen, wordt de kogel in een andere richting weggeduwd, zie het bovenstaande figuur. De grootte van de afwijking wordt bepaald door drie factoren: de hoek van de achterzijde van de kogel ten opzichte van de loopmondning, de gasdruk en de tijd dat de gassen op de kogel kunnen inwerken. Via experimenten is gebleken dat dit over een afstand van circa acht kalibers (45mm) plaatsvindt. Omdat de verbranding van de kruittlading in de eerste 405mm van de loop plaatsvindt, is de gasdruk aan de loopmondning van een geweer aanzienlijk kleiner dan bij een pistool waar de gasdruk aan de loopmondning vrijwel maximaal is. Highspeed patronen zullen, door hun hogere gasdruk eveneens een grotere afwijking veroorzaken.



De verbrandingsgassen hebben ter plaatse van de loopmondning nog steeds een hoge druk en snelheid, en passeren de kogel als deze de loop verlaat...



... maar ook bij luchtgeweren passeert de lucht het kogeltje vanaf de achterzijde.

De concentriciteit van de kogel is echter niet de enige reden dat een kogel scheef uit de loopmondning kan komen. De vormgeving van de kogel, symmetrie van de overgangskegel tussen kamer en loop, concentriciteit van huls kamer en loop, en de uitlijning van kamer en loop kunnen allemaal de oorzaak zijn of het verschijnsel versterken.

Nielsonbrothers arms inc. in de Verenigde Staten heeft naar dit verschijnsel onderzoek gedaan. Onderstaande tabel toont de gemeten resultaten van deze experimenten, gehouden op het Olympisch Training Center. Er werden 10-schots groepen geschoten en alle patronen hadden een randdikte van 1.041mm (0.041”).

Bullet Concentricity	Loose*	.000	.001	.002	.003
Eley 10x, Lot EEL98, series 1	.360	.350	.510	.570	
Eley 10x, Lot EEL98, series 2	.400	.390	.450	.570	
Average of the two series	.380	.370	.480	.570	

*Loose = bullet that is physically seated loose in the case.

Uit deze test blijkt dat iedere 0.025mm (0.001”) scheefstand of “run-out” de afwijking van het trefpunt toeneemt met 2.54mm per 50m afstand. Kogels met een run-out van 0.1mm (0.004”) veroorzaken een spreiding van circa 19.6mm, waardoor 33 procent van deze kogels een ‘9’ zal scoren.

Precessie nader verklaart

Waarom wil een roterend voorwerp een beweging haaks op zijn rotatieas tegenwerken?

In plaats van een volledige ring, worden vier puntmassa's A, B, C, D, gebruikt om de ring voor te stellen. De onderkant van de rotatie as wordt op zijn plaats gehouden maar kan in alle richtingen kantelen.

Wanneer een kantelende kracht (tilting force) op de bovenzijde van de rotatie as wordt uitgeoefend, wordt punt A in een omhoog gaande richting gedwongen en punt C in een neerwaartse richting (fig.1). Omdat de massa 'met de klok mee' roteert, zal punt A op de plaats zijn waar punt B was wanneer de gyro 90 graden is gedraaid. Hetzelfde geldt voor de punten C en D. Punt A verplaatst zich nog steeds met een omhoog gaande beweging wanneer het op de 90 graden positie is in fig.2, en punt C beweegt nog steeds in een omlaag gaande richting. De gecombineerde bewegingen van A en C dwingen de rotatie as in het "precessievlak" naar rechts te kantelen (precession motion) (fig.2). Dit wordt precessie genoemd. De rotatie as van een roterend voorwerp beweegt haaks op de roterende richting, in dit geval naar rechts. Wanneer de rotatie linksom is, kantelt de rotatie as in het precessievlak naar links. Als in het voorbeeld de kantelende kracht een trekkracht was geweest in plaats van een duwende kracht, zou de precessie naar links zijn gericht.

Wanneer de gyro nogmaals 90 graden is gedraaid (fig.3) is punt C op de plaats van punt A aangekomen, toen de kantelende kracht voor het eerst werd uitgeoefend. De neerwaarts gerichte kracht van punt C wordt nu tegengewerkt door de kantelende kracht, en de rotatie as kantelt niet in het vlak van de kantelende kracht. Hoe meer de kantelende kracht tegen de rotatie as duwt, hoe meer de rand aan de overzijde de as terug wil duwen wanneer de rand 180 graden is gedraaid.

Eigenlijk zal de rotatie as in dit voorbeeld enigszins in het vlak van de kantelkracht bewegen. De as zal iets kantelen omdat een klein gedeelte van de energie in de opwaartse en neerwaartse beweging van punten A en C wordt opgebruikt om de rotatie as te kantelen in het precessievlak. Dan, wanneer punten A en C uiteindelijk in de tegenoverliggende positie zijn aangekomen, is de kantelende kracht (welke constant is) groter geworden dan de opwaartse en neerwaartse tegengewerkende krachten.

