

# ET NYTT PERSPEKTIV PÅ FRIKSJON

foredrag på møte  
22. oktober 2016

av professor Anders Malthe-Sørensen, Fysisk Institutt, Universitetet i Oslo

I dette foredraget oppsummerte jeg arbeid på statisk friksjon og tok opp hvordan ny innsikt om en gammel naturlov har endret både vårt syn på friksjon og etter hvert vil kreve en ny formulering av loven for friksjon.

## Innledning

Friksjon er kraften som hindrer relativ bevegelse mellom to flater i kontakt. Vi skiller mellom to typer friksjon: smurt friksjon, der det er et tynt væskelag mellom de to flatene slik at de ikke er i direkte kontakt, men kun i kontakt med væsken, og tørr friksjon, der de to flatene er i direkte kontakt med hverandre. Jeg skal i dag kun snakke om tørr friksjon.

Studiet av friksjon har en lang historie. Jeg skal i dag ta dere gjennom noen trekk i denne historien. I hovedsak har vi utviklet to iterasjoner av en lov for friksjon. Friksjonsloven i sin første form ble formulert av Amontons [1] og Coloumb [2]. Dette er den klassiske loven for friksjon som vi lærer i fysikk i skolen: Friksjonskraften er proporsjonal med normalkraften, og vi skiller mellom statisk friksjon, når flatene er i ro i forhold til hverandre, og dynamisk friksjon, når flatene beveger seg i forhold til hverandre. Denne loven brukes i mange sammenhenger i dag, men for en god del anvendelser må vi også ta hensyn til hvor lenge de to flatene har vært i kontakt når det gjelder den statiske friksjonen og hvor fort de beveger seg i forhold til hverandre når det gjelder den dynamiske friksjonen. Da bruker vi en nyere formulering av friksjonsloven som kalles rate-and-state-friksjon som ble formulert av Ruina og Rice [3,4]. Til slutt skal jeg vise hvordan nye eksperimenter på statisk friksjon viser at vi må reformulere rate-and-state-friksjonsloven til også å ta hensyn til historien – til hvordan flatene beveget seg idet de kom i kontakt. Vi kaller denne loven for historieavhengig friksjon [5]. En formulering av en slik lov er nå under utvikling og vil utgjøre den tredje iterasjonen av friksjonsloven.

## **Motivasjon**

Friksjon har betydning for en rekke praktiske og vitenskapelige anvendelser i tillegg til at det er en interessant problemstilling i vår grunnleggende forståelse av naturen. En forståelse for og beskrivelse av friksjon er viktig for å kunne beskrive, forstå og forutsi oppførselen til geologiske systemer hvor stein glir mot stein – slik som i jordskjelv, oppsprekking, eller skred. Friksjonsloven er faktisk en av de store ukjente i gode beskrivelser av oppførselen til sprekke-systemer i jordskjelvsoner, og slik vil en bedre beskrivelse av friksjon kunne bidra til å gi en bedre beskrivelse og forutsigelse av jordskjelv. Ved Southern California Earthquake Center har de en beskrivelse av sprekkesystemene i Syd-California, og de ønsker å kunne gi et forvarsel på femti sekunder før et stort jordskjelv treffer Los Angeles, men en av de store ukjente i deres modeller er en god beskrivelse av friksjonen i sprekkesystemene. Friksjon har også enorm betydning for mekaniske systemer – fordi det både gir opphav til dissipasjon av energi ved bevegelse, og det gir grunnlag for feste når det trengs. Bedre forståelse av friksjon vil kunne gjøre det mulig å redusere dissipasjonen når det er viktig, øke den når det er ønskelig, og kanskje også endre den dynamisk og kontrollert. I mange biologiske systemer er også friksjon og adhesjon viktig: for eksempel for en gecko som henger fast på veggen, men likevel klarer å løfte foten fordi den består av små lameller som vrir seg fri fra overflaten når den løfter foten.

Friksjon er dessuten et fascinerende vitenskapelig problem som knytter sammen vår forståelse av naturlovene på liten og stor skala. Når to legemer begynner å bevege seg i forhold til hverandre, starter bevegelsen på den atomære skala, men den er samtidig knyttet sammen med den elastiske oppførselen til hele systemet – med den makroskopiske oppførselen til hele systemet. Derfor sier vi ofte at friksjon er et multi-skala-problem – et problem som spenner over flere skalaer hvor vi har forskjellige fysiske modeller på de forskjellige skalaene. Dessuten er det overraskende, og frustrerende, for en fysiker å vite at vi ikke kan regne ut friksjonskraften mellom to legemer. Fordi vi mangler den nødvendige grunnleggende forståelsen av friksjon.

## **Kort oversikt – tre lover gjennom historien**

Studiet av friksjon har en lang historie fordi det har hatt stor praktisk betydning. Vi finner tidlige innsikter i friksjon og effekten av smøremidler som

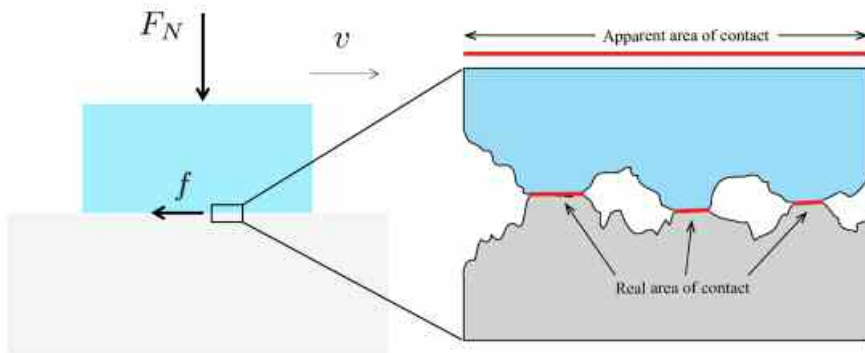
vann eller olje i gamle Egyptiske veggmalerier fra 1800 f.kr [6] som viser at bedre forståelse og beherskelse av friksjon var viktig for å kunne skyve store steinstatuer.

### Tidlig beskrivelse av friksjon

En av de første klare beskrivelsene av friksjonslovene finner vi i tegninger fra Leonardo da Vinci. Disse tegningene viser en kloss på et flatt underlag. Klossen er tegnet liggende på forskjellige sider, men en pil som illustrerer kraften som skal til for å bevege klossen, er like lang i alle tilfeller. Dette viser at da Vinci kjente til et grunnleggende aspekt ved friksjonskraften – den er kun avhengig av normalkraften og ikke av overflatens størrelse.

### Amontons og Coloumbs friksjonslov

Dette aspektet er inkludert i Amontons formulering av friksjonskraften mellom to legemer. Amontons teori er illustrert i figur 1, som viser en kloss i kontakt med et flatt underlag. Det virker en kraft  $F_N$  vertikalt ned på klossen og en friksjonskraft i horisontal retning, rettet mot den relative hastigheten mellom legemene. Ifølge Amontons er den dynamiske friksjonskraften – friksjonskraften som virker når legemene er i relativ bevegelse – proporsjonal med normalkraften,  $f = \mu_d F_N$  hvor proporsjonalitetskonstanten kalles den dynamiske friksjonskoeffisienten. Hvis legemene ikke er i relativ bevegelse,



Figur 1: Illustrasjon av kontakt mellom en kloss og et underlag.

virker en statisk friksjonskraft som motvirker andre krefter så legemene holder seg i ro. Den maksimale statiske friksjonskraften er  $f = \mu_s F_N$ , hvor  $\mu_s$  kalles den statiske friksjonskoeffisienten. Coloumb videreutviklet denne teorien og viste at den dynamiske friksjonskoeffisienten også er til en viss grad avhengig av hastigheten, og at den statiske friksjonskoeffisienten er avhengig av hvor lenge legemene har vært i kontakt.

### **Faktisk og tilsynelatende kontaktareal**

Disse observasjonene ble etter hvert satt i system og delvis forklart. En sentral observasjon er at friksjonskraften kun er avhengig av normalkraften, men ikke av størrelsen på overflaten. Dette kan ved første øyekast virke underlig, fordi man skulle tro at friksjon har sitt utspring i at de to overflatene henger fast i hverandre på liten skala og derfor skulle øke med størrelsen på kontaktflaten. Men de fleste naturlige overflater er ru, slik at de består av små ujevnheter helt ned til en neste atomær skala. (Se figur 1). Når to overflater presses sammen, vil de kun være i kontakt på noen få steder som vi kaller asfæriteter. Vi kaller dette arealet det faktiske kontaktarealet. Friksjonskraften er proporsjonal med det faktiske kontaktarealet, og det faktiske kontaktarealet er proporsjonalt med normalkraften – jo hardere vi presser to legemer sammen, jo større blir det faktiske kontaktarealet. Dette kan vi også bruke til å estimere størrelsen på friksjonskraften, fordi vi vet hvor sterkt to materialer binder til hverandre, og dermed kan vi estimere styrken på hver asfæritet. Dessverre gir et estimat basert på summen av styrkene til alle asfæritetene sjelden en realistisk verdi for friksjonen, fordi dynamiske prosesser idet flatene begynner å bevege seg i forhold til hverandre, har stor betydning for hvor stor del av kontaktarealet som bidrar til den faktiske friksjonskraften.

### **Rate-and-state-friksjon**

Modellen vi nå har skissert, gir dessuten opphav til en ny effekt. Kontaktene i asfæritetene vil ha en tendens til å flyte utover etter lang tid – fordi det vil være store krefter i disse kontaktene, og de fleste materialer flyter over lengre tid. Det betyr at kontaktene i asfæritetene øker med tiden, og derfor vil også den statiske friksjonskraften øke. Dette gir opphavet til en del av

rate-and-state-friksjonsloven som innfører nettopp økning av friksjonskoeffisienten med tiden. Dessuten viser eksperimenter at friksjonskoeffisienten også endrer seg med den relative hastigheten til de to legemer. Disse effektene ble inkludert i en elegant formulering av Ruina og Rice [3,4] – en formulering som kalles rate-and-state-friksjonsloven. Det er denne loven som i dag brukes i geologiske og tekniske anvendelser.

### **Nye eksperimenter avdekker hull i teoriene**

Nye eksperimentelle metoder åpner på 2000-tallet for nye eksperimenter som gjør det mulig å se på detaljer i hvordan to legemer begynner å bevege seg i forhold til hverandre, slik at man kan studere prosessen som leder fra statisk friksjon til dynamisk friksjon i detalj. Jay Fineberg [7] ved Universitetet i Tel Aviv bygget opp et eksperimentelt oppsett basert på en tynn kloss med PMMA som var i kontakt med et stivt, gjennomsiktig underlag av glass. Ved å lyse gjennom underlaget og opp mot kontaktflaten med PMMA med et laserark i en viss vinkel, vil lyset gå igjennom kontakten der hvor PMMA og glass er i kontakt, mens det vil reflekteres tilbake ved total indre refleksjon der hvor PMMA ikke er i kontakt med glasset. Ved å ta bilde av lyset som går igjennom kontaktoverflaten, kan man således se hvor stort kontaktarealet er. Slike bilder kan tas med et svært hurtig kamera slik at man kan se endringer i kontakten med en tidsoppløsning som er nær et mikrosekund. Dette gjør det mulig å se hvordan de to overflatene mister kontakten når man dytter på PMMA-klossen. Da Fineberg gjorde disse eksperimentene, oppdaget han at de to overflatene ikke begynte å bevege seg jevnt. Det som skjer, er at PMMA-klossen først henger fast i underlaget og presses sammen etter hvert som man trykker hardere og hardere på klossen. Dernest begynner klossen å glippe fra underlaget nær den siden man dytter på. Området hvor klossen glipper, beveger seg så som en sprekk – en forflytningsfront – inn fra siden med en hastighet nær lydshastigheten i materialet (ca. 1000 m/s), men den stopper etter en liten avstand som er mye mindre en lengden på klossen. Når man fortsetter å dytte, vil nye fronter utløses og bevege seg gradvis lenger inn mot grenseflaten mellom klossen og underlaget. Når kraften man dytter med når en viss grenseverdi – den statiske friksjonskraften – vil fronten bevege seg helt gjennom grenseflaten, og klossen vil begynne å gli.

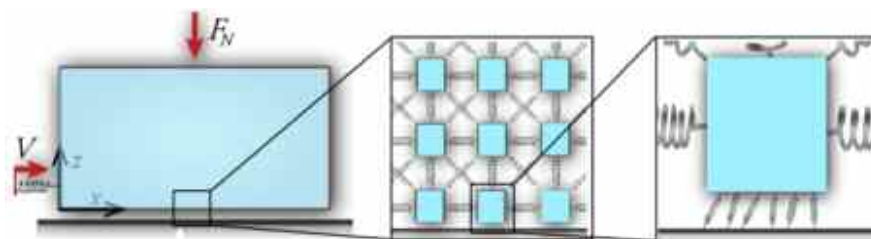
Men den virkelige overraskende oppdagelsen var at når fronten er ca. 1/4 inn i grenseflaten, vil den i noen tilfeller med ett bevege seg mye saktere,

med en hastighet som kun er ca. 10 % av lyd hastigheten. Dessuten viste målingene til Fineberg [7] at klossen beveger seg hurtig når fronten beveger seg gjennom grenseflaten, men at den fortsetter å gli langsomt en stund etterpå før den stanser helt. Disse observasjonene er viktige fordi en nøyaktig beskrivelse av hvordan fronten oppfører seg, er et nødvendig element i å forstå og forutsi den statiske friksjonskraften. En teori for friksjon må derfor kunne beskrive disse prosessene. Men anvendelser av de klassiske teoriene, både Amontons-Coloumb-teorien og rate-and-state-teorien, har ikke lyktes i å reprodusere den observerte dynamikken. Kanskje mangler et vesentlig element i disse teoriene?

### **En ny modell binder skalaer sammen**

Vi har utviklet en ny modell for å forklare og forstå oppførselen som er observert i eksperimentene. Modellen er basert på en lang tradisjon i fysikk hvor vi lager modellen så enkel som mulig, men hvor den likevel klarer å reprodusere de viktigste elementene i observasjonene. Slik kan vi plukke ut de elementene i modellen og de tilsvarende fysiske prosessene som er nødvendige. Ideen bak er at vi bygger en fysisk motivert modell på en liten skala, og så bruker vi denne modellen til å forutsi oppførselen på en større skala. Vi kaller slike modeller for fler-skala- eller multi-skala-modeller.

Modellen vi innførte [5] beskriver kontakten mellom klossen og underlaget på tre skalaer som illustrert i figur 2. Hele klossen modelleres som et elastisk legeme ved at det består av mange elementer knyttet sammen med elastiske fjærer. De nederste elementene vekselvirker med underlaget på en måte som skal gjenspeile oppførselen til asfæritetene. Dette modellerer vi ved en rekke fjærer, hvor hver enkelt fjær representerer kontakten med en asfæritet. Vi innfører en lov for hvordan en slik fjær oppfører seg: Den



Figur 2: Illustrasjon av modellen over flere skalaer. [XXX]

strekker seg til en viss lengde, deretter ryker den, og den forbindes igjen med underlaget etter en viss tid. Dette reflekterer at når en asfæritet begynner å skli, smelter et tynt lag på toppen av asfæriteten, og det tar en viss tid før laget størkner igjen. Siden asfæritetene har litt forskjellig størrelse og form, vil det være en viss tilfeldig spredning i hvor lang tid det tar før asfæriteten fester seg igjen.

Det viser seg at når denne enkle modellen drives ved at den dyttes fra siden, reproducerer den alle aspekter av eksperimentene: Det oppstår spontant langsomme fronter, og forflytningshastigheten til klossen etter at den har begynt å gli, passer svært godt med den observerte forflytningshastigheten (slip-hastigheten). Dette er til nå den eneste modellen som har klart å reproducere spontane langsomme fronter og langsom forflytning av overflaten [5]

### **Konsekvenser av modellen**

Siden modellen er i stand til å reproducere eksperimentene kan vi også bruke den til å lære om de underliggende prosessene og gjøre nye forutsigelser om friksjonsprosessen. Modellen viser at det er den langsomme forflytningshastigheten etter at klossen har begynt å skli, som gir opphav til de langsomme frontene. Dessuten gir modellen en svært interessant innsikt: I modellen vil den statiske friksjonskoeffisienten være avhengig av hvordan klossen stanser opp etter at den har glidd – den statiske friksjonskoeffisienten avhenger av akselerasjonen til klossen mens den stanser opp. Hvis den stanser opp svært hurtig, vil klossen være i ro når alle de nye kontaktene (asfæritetene) dannes/størkner igjen, slik at de alle sammen må strekkes en lang avstand før de igjen ryker. Det gir en høy statisk friksjon. Hvis klossen stanser langsomt opp, vil de nye kontaktene (asfæritetene) dannes/størkne mens klossen er i bevegelse, slik at noen vil strekkes langt og noen vil strekkes kort. Det betyr at klossen må strekkes mindre før kontaktene ryker og klossen begynner å skli, og dermed blir den statiske friksjonskoeffisienten mindre. Nøyaktige beregninger i modellen viser at forskjellen i statisk friksjonskoeffisient kan bli så stor som en faktor to avhengig av akselerasjonen mens klossen stanser [8]. Denne effekten er ikke inkludert i rate-and-state-friksjonsloven, og effekten er typisk ti ganger større enn effekten av ventetid som er inkludert i rate-and-state-friksjonsloven.

### En ny modell for friksjon – historieavhengig friksjon

Modellen peker derfor på at den klassiske rate-and-state-friksjonsloven i noen tilfeller må erstattes av en ny lov som også tar hensyn til historien til kontakten – til hvordan de to flatene stanset opp da de kom i kontakt. Skjedde dette langsomt eller hurtig? Vi arbeider nå med å utvikle en ny formulering av friksjonsloven i form av en ”historieavhengig friksjon” som vil være en utvidelse av rate-and-state-friksjonsloven. Vi forventer at denne loven når den er utviklet, vil bli den dominerende modellen som blir brukt i alt fra beskrivelsen av jordskjelv til nanomaskiner.

### Referanser

- [1] Amontons, G. De la resistance cause'e dans les machines (About resistance and force in machines). *Mem l'Academie R A*: 257–282 (1699)
- [2] Coloumb, C.A. *Experiences destinees a determiner la coherence des fluides et les lois de leur resistance dans les mouvements très lents*. Paris: 246–305 (1801).
- [3] Ruina, A. Slip instability and state variable friction laws, *Journal of Geophysical Research*, 88, 359–10 (1983).
- [4] Rice, J.R., Ruina, A., Stability of steady frictional slipping, *Journal of Applied Mechanics*, 50, 343–349 (1983).
- [5] Trømborg, J.K., Sveinsson, H.A., Scheibert, J., Thøgersen, K., Amundsen, D.S., Malthe-Sørenssen, A., Slow slip and the transition from fast to slow fronts in the rupture of frictional interfaces, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 8764–8769 (2014).
- [6] Fall, A., Weber, B., Pakpour, M., Lenoir, N., Shahidzadeh, N., Fiscina, J., Wagner, C., Bonn, D. Sliding Friction on Wet and Dry Sand, *Physical Review Letters*, 112, 175502 (2014).
- [7] Rubinstein, S.M., Cohen, G., Fineberg, J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction, *Nature*, 430, 1005–1007 (2007); Ben-David, O., Rubinstein, S.M., Fineberg, J. Stick-slip and the evolution of frictional strength, *Nature*, 463, 76–79 (2010); Ben-David, O., Cohen, G., Fineberg, J. The Dynamics of the Onset of Frictional Slip, *Science*, 330, 211–214 (2010).
- [8] Trømborg, J.K., Sveinsson, H.A., Thøgersen, K., Scheibert, J., Malthe-Sørenssen, A. Speed of fast and slow rupture fronts along frictional interfaces, *Physical Review E*, 92, 012408 (2015).