



## Skyldes mach dip fenomenet i supersoniske raketter fysiske krefter eller barometriske måleavvik?

Forfatter: Linus Natvig Framstad, Elvebakken videregående skole

*Denne studien undersøker årsaken til det uventede fenomenet kjent som mach dip, hvor barometerdata viser til et midlertidig fall i høyde idet raketten bryter lydturen. Ved å analysere rakettdata levert av Propulse NTNU utforskes problemstillingen om dette skyldes reelle fysiske krefter eller barometriske måleavvik. Gjennom en omfattende analyse i Python sammenlignes rådata mot et Kalman filter for å isolere differansen mellom målt og estimert høyde. Resultatene viser et tydelig brudd i korrelasjon mellom barometrisk trykk og faktisk vertikal hastighet i den transsoniske tidsperioden. En residualanalyse bekrefter avvik på over 100 meter, noe som ikke støttes av akselerometerdata. Studien konkluderer med at mach dip er et resultat av lokale trykkforstyrrelser og sjokkbølger som påvirker de barometriske sensorene.*

### Innledning

Presise høydemålinger er avgjørende for høyhastighetsraketter. Data om høyde og vertikal hastighet brukes til å analysere motorkraft, stabilitet og aerodynamiske krefter. I tillegg gjør slike målinger det mulig å sammenligne reelle fly data med simuleringsmodeller. På tross av avansert målestyr viser data fra enkelte rakettopskytninger et uventet fenomen. Når raketten bryter lydturen registreres et midlertidig fall i høyde, et fenomen kjent som mach dip.

Hastigheten til et legeme i forhold til lydens hastighet uttrykkes med Mach-tallet ( $M$ ) (Tandberg, 2024). Lydens hastighet i luft ved normale atmosfæriske forhold er omtrent 343 m/s. Ved  $M < 1$  er hastigheten subsonisk, ved  $M > 1$  er hastigheten supersonisk, og når Mach-tallet er mellom 0,8 og 1,2 er hastigheten transsonisk. Her dannes det sjokkbølger foran raketten som utgjør en stor endring på luftstrømmen rundt den, noe som påvirker både trykk og temperatur (Holtebekk, 2026). Disse endringene i de atmosfæriske forholdene rundt raketten kan i teorien påvirke hvordan raketten oppfører seg.

I praksis måles høyde ofte med barometriske sensorer som estimerer høyde ut ifra målt lufttrykk. Disse sensorene måler derfor ikke høyde direkte, men beregner den basert på den atmosfæriske sammenhengen mellom trykk og høyde. Det teoretiske grunnlaget for denne beregningen er den hypsometriske ligningen, men for praktiske formål kan en forenklet versjon kjent som Laplaces høydemålingsformel benyttes:

$$h = 18\,400\text{ m} \cdot \log_{10}\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

Her er  $p_0$  lufttrykket ved bakkenivå og  $p$  det lokale trykket målt av raketten (Grøn, 2025). Formelen viser at høyden  $h$  er avhengig av det målte lufttrykket. Siden sensoren måler det lokale trykket, kan den påvirkes av lokale trykkforstyrrelser. Andre studier og rapporter fra rakettoppskytninger viser at når raketten nærmer seg Mach 1, oppstår mach dip fenomenet, et midlertidig fall i høyde (Knight, 2004). Et registrert fall i høyde kan enten bety at raketten fysisk påvirkes av aerodynamiske krefter, eller at høydemålingene forstyrres og registrerer feil data. Feil i data som høydemålinger kan gi misvisende informasjon om ytelsen og dynamikken til raketten. Å forstå mach dip fenomenet er viktig for å sikre at data fra høyhastighetsraketter tolkes korrekt, noe som fører til en bedre forståelse og vurdering av hvordan raketten yter og oppfører seg under supersonisk flygning i tillegg til å gi en forbedret sikkerhet. Denne studien har derfor som mål å undersøke årsaken til mach dip fenomenet. Artikkelen skal svare på følgende spørsmål:

*Er mach dip et resultat av fysiske krefter som påvirker raketten høyde under supersonisk flygning, eller skyldes fenomenet måleavvik i de barometriske sensorene forårsaket av sjokkbølger og trykkforstyrrelser.*

Basert på kjent teori om barometrisk høydemåling og trykkforstyrrelser ved transsonisk hastighet fremsettes følgende hypotese: Mach dip er ikke et resultat av en fysisk baneendring i raketten, men skyldes midlertidige måleavvik i de barometriske sensorene.

## Metode

Datagrunnlaget for denne studien er hentet fra tre rakettoppskytninger i regi av Propulse NTNU. Mens rådata ble levert av organisasjonen, er all etterfølgende databehandling, statistisk analyse og filtrering av mach dip fenomenet utført som en del av denne studien. Analysen omfatter data fra de tre følgende oppskytningene:

- Project Heimdall (2025)
- Project Bifrost (2023)
- Project Stetind (2021)

Hver rakett har to datasett, da det ble brukt to forskjellige flight computers for redundans. For denne analysen fokuseres det primært på ett datasett per rakett, men dobbeltregistreringene gir en økt sikkerhet og mulighet for kontroll av måleavvik.

Data fra Project Bifrost (2023) og Project Heimdall (2025) ble inkludert i analysen som kontrollgrupper. Ved gjennomgang av disse datasettene ble det registrert maksimale hastigheter på 110,2 m/s og 283,0 m/s. Siden disse hastighetene ligger godt under lydens hastighet (Ca. 343 m/s) forble disse rakettenes subsoniske. Derfor egner dataene fra disse rakettoppskytningene seg godt for å verifisere at mach dip fenomenet er fraværende i subsoniske hastigheter.

Rådata fra oppskytningene ble klargjort og strukturert i Python. Databehandlingen inkluderte utvelging av relevante variabler og fjerning av mangelfulle verdier for å sikre pålitelige beregninger og visualiseringer. Analysen fokuserte spesifikt på et tidsintervall på omtrent 5 sekunder rundt passering av lydmuren, da det er i dette vinduet de transsoniske forstyrrelsene er mest tydelig.

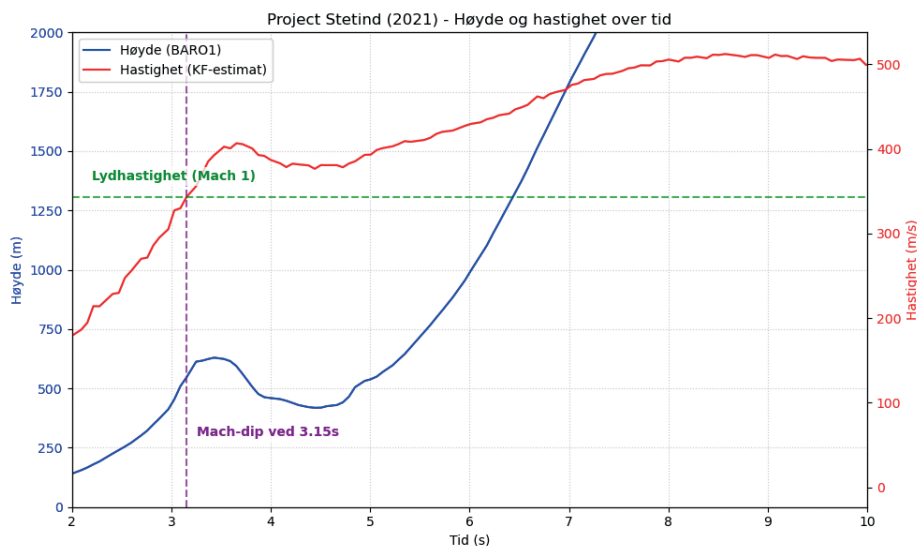
For å identifisere og visualisere mach dip fenomenet ved krysning av lydmuren ble barometerhøyden plottet mot tiden med hastighet vist på en sekundær akse. Videre ble den deriverte av barometerhøyden beregnet for å synliggjøre plutselige endringer i stigningen. Det ble også utarbeidet korrelasjonsmatriser for å undersøke sammenhengen mellom de ulike datapunktene i et subsonisk tidsrom og et transsonisk tidsrom.

En korrelasjonsmatrise er en tabell som presenterer den statistiske sammenhengen mellom flere variabler samtidig. I visualiseringen er disse verdiene kodet med farge, slik at mørke farger indikerer en høy korrelasjon og lysere farger indikerer en lav eller ingen korrelasjon. For å skille målefeil fra raketts faktiske bevegelse, ble det utført en residualanalyse. Residualene beregnes som differansen mellom rådata fra barometeret og høydedataene fra et Kalman filter. Et Kalman filter er en matematisk algoritme som estimerer den mest sannsynlige tilstanden til et system ved å kombinere usikre målinger fra flere kilder (Øverby, 2025). I denne studien veier filteret data fra både akselerometer og barometersensorer opp mot hverandre. Ved bruk av de fysiske bevegelseslovene kan filteret filtrere ut ekstreme utslag i enkelte sensorer. Som for eksempel trykkforstyrrelser ved Mach 1 og dermed gi et mer nøyaktig estimat av raketts faktiske høyde eller hastighet enn det en enkeltsensor kan alene. Store avvik i residualanalysen vil dermed indikere at en av sensorene viser upålitelig data.

Basert på teorien forventes det at fenomenet er et resultat av sensorforstyrrelser heller enn en fysisk baneendring. Studien vil derfor undersøke om dataene støtter antagelsen om måleavvik eller om det finnes bevis for et reelt høydetap.

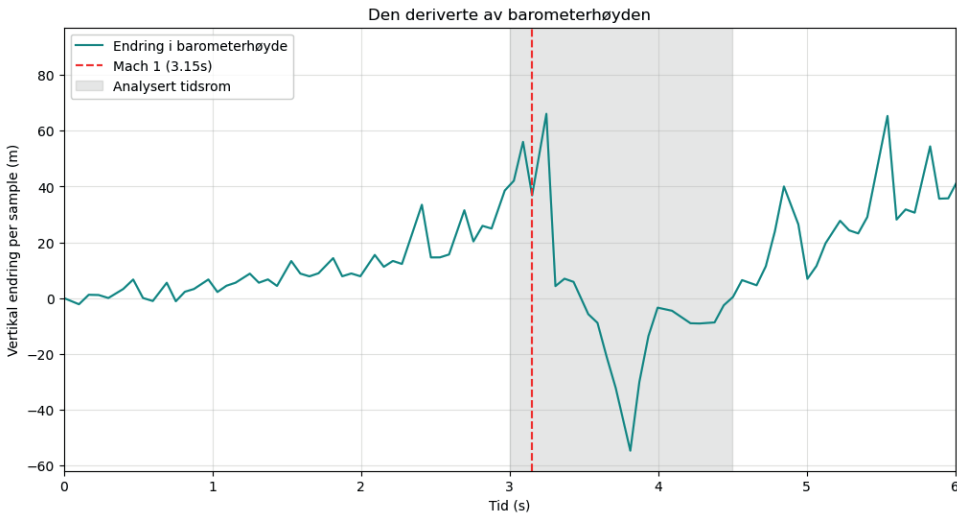
## Resultater

Analysen av dataene fra Project Stetind presenteres gjennom fire visualiseringer som viser sammenhengen mellom høyde, hastighet, og sensorstabilitet.



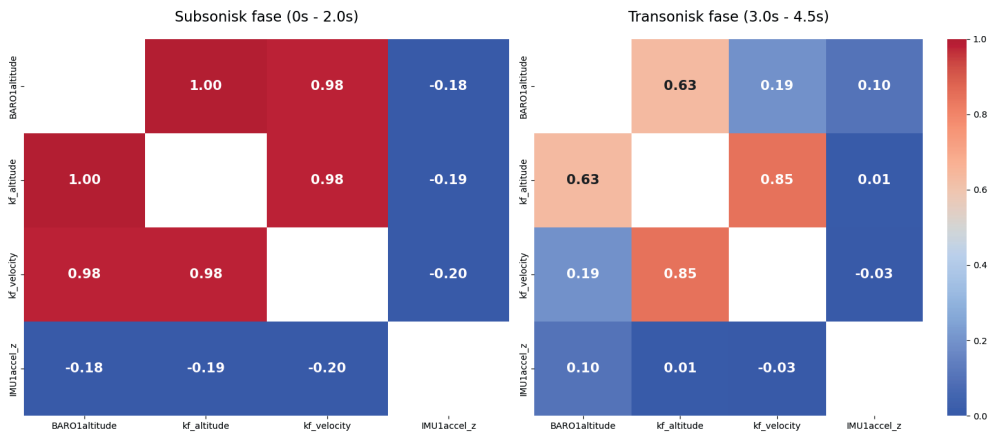
Figur 1: Målt barometerhøyde og filtrert hastighet over tid. Grønn linje markerer lydhastigheten, mens lilla linje markerer tidspunktet lydturen passerer.

Figur 1 viser målt barometerhøyde over tid med raketts filtrerte hastighet på en sekundær akse. Grafen viser at den barometriske høyden stiger jevnt frem til tidspunktet hvor raketten passerer lydturen. På dette punktet viser grafen et midlertidig fall i høyde, før kurven flater ut og fortsetter stigningen i det personlige området.



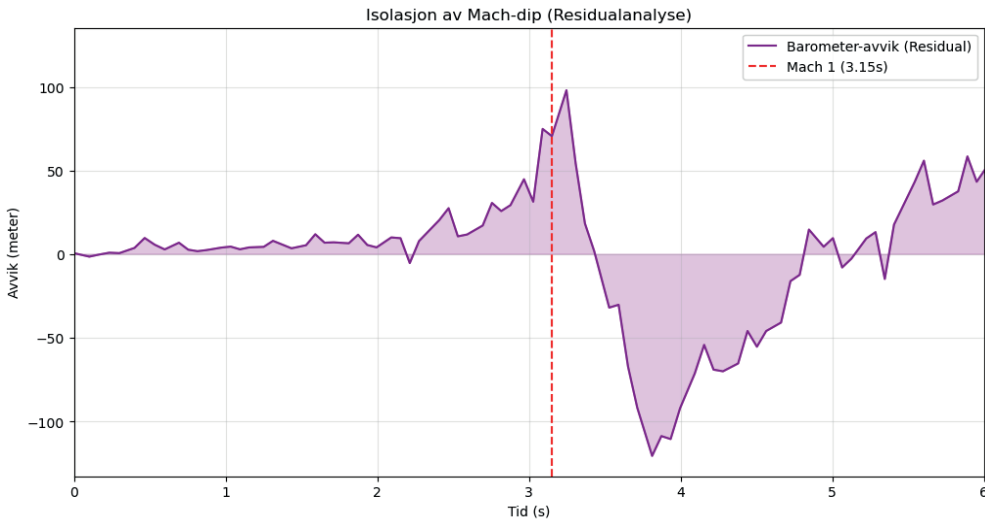
Figur 2: Identifikasjon av mach dip gjennom den deriverte av barometerhøyden. Det grå feltet markerer det analyserte tidsrommet for den transsoniske perioden.

For å visualisere endringsraten i denne perioden viser figur 2 den deriverte av barometerhøyden. Her observeres det at grafen synker brått i det markerte transsoniske feltet før den stiger igjen etter den transsoniske fasen.



Figur 3: Sammenligning av korrelasjonsmatriser. Venstre matrise viser den subsoniske perioden, mens høyre matrise viser den transsoniske perioden. Tallverdiene i cellene er korrelasjonskoeffisienter (fra -1 til 1) der 1,0 betyr perfekt korrelasjon og 0 betyr ingen korrelasjon.

Korrelasjonen mellom de ulike sensorene og estimatene er visualisert gjennom korrelasjonsmatriser i figur 3. Matrisen til venstre viser den subsoniske fasen hvor det er en stabil korrelasjon for alle variabler. I matrisen til høyre som representerer den transsoniske fasen er korrelasjonen endret betydelig for barometerhøyden sammenlignet med de resterende variablene.



Figur 4: Det lilla feltet representerer differansen mellom målt barometerhøyde og filtrert Kalman høyde. Et negativt residual betyr at barometeret rapporterer lavere høyde enn det Kalman filteret estimerer.

Til slutt viser figur 4 en residualanalyse som isolerer differansen mellom den rå barometerhøyden og det filtrerte estimatet fra Kalman filteret. Mens residualene ligger stabilt i starten av flyvningen, viser grafen et stort utslag i det lilla feltet idet raketten passerer Mach 1. Dette feltet visualiserer avstanden mellom de to målemetodene i tidsrommet mach dip oppstår.

## Diskusjon

Resultatene fra analysen av Project Stetind gir ett tydelig bilde av mach dip fenomenet idet raketten passerer Mach 1. Som illustrert i figur 1, observeres det et tydelig fall i den barometriske høyden akkurat når lydturen brytes i det transsoniske tidsrommet. Denne observasjonen underbygges av figur 2 som viser den deriverte av den barometriske høyden. Her vises det at stigningen faller til negative verdier. Matematisk vil en negativ derivert bety at raketten beveger seg nedover mot bakken. Ved å sammenligne dette med den filtrerte hastighetsgrafen på den sekundære aksis i figur 1 motsier de hverandre. På dette samme tidspunktet har raketten en positiv vertikal hastighet på over 500 m/s. For at den negative deriverte i figur 2 skulle representere en reell fysisk hendelse, må raketten ha blitt utsatt for ekstreme eksterne krefter. Da slike krefter ikke er registrert av andre sensorer, peker disse observasjonene mot at fenomenet er et resultat av måleavvik fremfor en reell endring i høyden.

Den fysiske årsaken til det registrerte avviket kan forklares gjennom den barometriske høydemålingen. Rakettsensoren beregner høyden indirekte ved å måle det lokale trykket. Som tidligere nevnt kan Laplaces høydemålingsformel brukes for dette. I det transsoniske området endres luftstrømmen rundt raketten og det dannes sjokkbølger. Dette fører til kortvarige lokale trykkfall. Ifølge Laplaces høydemålingsformel er den beregnede høyden matematisk avhengig av det målte lufttrykket. Om dette trykket endres, vil det resultere i en høyere eller lavere beregnet verdi for høyden.

For å verifisere påstanden om måleavvik, er det viktig å vurdere barometersensorens pålitelighet opp mot andre sensorer eller estimater. Sammenligningen av korrelasjonsmatrisene i figur 3 gir et matematisk bevis på dette. I den subsoniske fasen er korrelasjonen mellom barometerhøyden og det filtrerte Kalman estimatet perfekt (1,0). Dette indikerer at sensorene fungerer optimalt under subsonisk flygning. I det transsoniske tidsrommet observeres det et skifte, og korrelasjonen faller til 0,63, mens korrelasjonen mellom barometerhøyde og hastighet kollapser til 0,19. Dette bruddet i korrelasjon som i figur 3 visualiseres gjennom blant annet fargeendring, bekrefter at barometersensoren slutter å levere pålitelig høydedata.

Kalman filteret håndterer dette med å kombinere akselerometerdataen med barometerdataen. Akselerometeret påvirkes ikke i like stor grad av trykkendringer, men måler de faktiske fysiske kreftene som virker på raketten. Residualanalysen i figur 4 isolerer differansen mellom barometerhøyden og Kalman høyden. Figur 4 viser et negativt avvik i barometerdataene på over 100 meter sammenlignet med det filtrerte estimatet. At dette avviket oppstår rett etter passering av Mach 1 styrker hypotesen om at barometeret leverer feilaktig data.

Tidligere rapporter fra rakettoppskytninger blant annet dokumentert av (Knight, 2004) beskriver ett tilsvarende mach dip fenomen og peker på at dette ofte skyldes feil i trykkbaserte målinger. Funnene fra Project Stetind er derfor konsistente med eksisterende litteratur og styrker tolkningen av mach dip som et sensorrelatert fenomen fremfor et fysisk tap av høyde ytterligere.

Konklusjonen om at mach dip er et sensorrelatert avvik styrkes ytterligere ved sammenligning med kontrollgruppene fra 2023 og 2025. I disse oppskytningene, hvor topphastighet ble målt til 110,2 m/s og 283,0 m/s, ble det ikke registrert noen uregelmessigheter i den barometriske høyden. Fraværet av mach dip i disse subsoniske flyvningene bekrefter og underbygger at raketten faktisk må nå den transsoniske sonen for at de lokale trykkforstyrrelsene skal bli kraftige nok til å skape dette fallet i høyde som vi ser i Project Stetind. En klar styrke ved denne studien er bruken av flere uavhengige visualiseringer og analysemetoder for å undersøke mach dip fenomenet. Ved å kombinere rådata (figur 1 og 2), sammenligne korrelasjonsmatriser (figur 3), visualisere avvik (figur 4), og bruk av kontrollgrupper, dannes et helhetlig bilde av sensoroppførselen rundt passering av lydturen. At alle disse metodene peker mot samme tolkning, styrker hypotesen om at mach dip i hovedsak skyldes måleavvik i barometriske sensorer.

Samtidig finnes det usikkerheter knyttet til studiens datagrunnlag. Antall oppskytninger som faktisk passerer Mach 1 er begrenset, noe som reduserer muligheten for en generalisering. Resultatene er derfor mest representative for den analyserte oppskytningen, og ikke nødvendigvis for alle høyhastighetsraketter. Videre forutsetter analysen at Kalman filterets estimerte høyde gir et korrekt bilde av raketens faktiske bevegelse. Selv om Kalman filteret effektivt reduserer støy, kan også dette estimatet påvirkes av feil i inngangsdataene. I tillegg kan ekstreme vibrasjoner ved passering av lydturen i teorien påvirke akselerometerets nøyaktighet, noe som ville hatt en innvirkning på Kalman filterets estimater. Likevel, gitt samsvaret mellom teorien og de observerte dataene vil det være en meget lav sannsynlighet for at mach dip fenomenet representerer en fysisk baneendring. Analysen konkluderer med at fenomenet i hovedsak skyldes barometriske måleavvik forårsaket av trykkforstyrrelser grunnet krysning av lydturen.

## Bibliografi

- Grøn, Ø. (2025, Februar 24). *barometrisk høydemåling*. Hentet fra Store Norske Leksikon: [https://snl.no/barometrisk\\_h%C3%B8ydem%C3%A5ling](https://snl.no/barometrisk_h%C3%B8ydem%C3%A5ling)
- Holtebekk, T. (2026, Januar 22). *Sjokkbølge*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/sjokkb%C3%B8lge>
- Knight, C. (2004, November 27). *Launch Report -- Chuck Knight's Photo1 Rocket*. Hentet fra Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site: <https://nakka-rocketry.net/ckpho1.html>
- Tandberg, E. (2024, November 26). *mach*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/mach>
- Øverby, H. (2025, Februar 22). *Kalmanfilter*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/kalmanfilter>