

# Gravimetri i Norge i 200 år

Bjørn Ragnvald Pettersen og Bjørn Geirr Harsson

Vitenskapelig bedømt (refereed) artikkel

*Bjørn Ragnvald Pettersen and Bjørn Geirr Harsson: Two centuries of gravimetry in Norway.*

KART OG PLAN, Vol. 74, pp. 46–59, POB 5003, NO-1432 Ås, ISSN 0047-3278

The first determinations of gravity in Norway were made by Edward Sabine in 1823 with a pendulum instrument made by Henry Kater. Seventy years later a Sterneck pendulum was acquired by the Norwegian Commission for the International Arc Measurements. It improved the precision by one order of magnitude and eventually reduced the bias of the absolute calibration from 100 mGal to 15 mGal. The last pendulum observations in Norway were made in 1955. Relative gravimeters based on the principle of torsion balance had then improved the precision by at least one more order of magnitude. Their operational efficiency multiplied the number of observed sites in Norway. The introduction of absolute gravimeters, especially after 2004, improved the calibration by 3–4 orders of magnitude and immediately revealed the secular changes of the gravity field in Norway. This has later been confirmed by satellite gravimetry, which provides homogeneous data sets for global and regional gravity models. The extensive observational effort, especially by the Norwegian Mapping Authority during the second half of the 20<sup>th</sup> century to provide data for a regional geoid for Norway and adjacent ocean areas, has also allowed research at Norwegian universities in geodesy, geophysics, and oceanography during the last 15 years. This has led to several doctoral dissertations, a full century after the first determinations of gravity at sea onboard the Norwegian polar vessel Fram during frozen-in conditions in the Arctic Ocean, and development at the University of Oslo of an indirect method for deducing gravity at sea with a hypsometer. History demonstrates that new technical developments in gravimeters were always imported to Norway from abroad. Instruments were made in Denmark, Germany, and USA and their first use in Norway was by visiting scientists from abroad.

*Keywords:* Gravimetri – pendelmålinger – gravimeter – satellitter – nasjonalt tyngdenett – geofysiske effekter.

*Bjørn Ragnvald Pettersen*, Professor dr.philos., Department of Mathematical Sciences and Technology, NMBU, Box 5003, NO-1432 Ås. E-mail: bjorn.pettersen@nmbu.no

*Bjørn Geirr Harsson*, Chief Engineer (emeritus), Kartverket, NO-3507 Hønefoss. E-mail: bjorn.geirr.harsson@kartverket.no

## Innledning

Betegnelsen gravimetri er sammensatt av latin *gravis*=tung og gresk *μετρέω*= å måle. Gravimetri betyr altså å måle tyngden, det vil si en empirisk bestemmelse av tyngdeakselerasjonens styrke og dens deriverte, tyngdegradienten. For 200 år siden kunne slike oppgaver utføres kun på jordens overflate. I dag kan observasjoner også foretas til sjøs, i fly og i satellitter, sistnevnte i bane både rundt jorden og andre planeter.

Tyngdens akselerasjon angis i  $\text{ms}^{-2}$  i SI-systemet. Tyngdegradienten har enhet  $\text{s}^{-2}$ . I geodesi og geofysikk har det vært tradisjon i mange år å benytte enheten  $\text{Gal}=1 \text{ cms}^{-2}$ ,

oppkalt etter Galilei og definert i cgs-enheter. For måleoppgaver støter man ofte på de avledede størrelsene  $\text{milliGal}=[\text{mGal}]=10^{-5} \text{ ms}^{-2}$  og  $\text{mikroGal}=[\mu\text{Gal}]=10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , knyttet til instrumenter med tilsvarende presisjon.

Tyngdens akselerasjon for et sted på overflaten av jordkloden ( $g \approx 9,8 \text{ ms}^{-2}$ ) er resultatet av gravitasjonen forårsaket av jordens masse og sentrifugalakselerasjonen forårsaket av jordens rotasjon. Vektorens retning definerer loddlinjen på stedet. Observasjoner som foretas i rommet er ikke påvirket av jordens rotasjon og representerer kun gravitasjonen fra jordmassen på det sted i rommet instrumentet befinner seg. Ved meget høy

målepresisjon må det korrigeres for gravitasjonskrefter fra andre kloder i solsystemet og de temporære effektene de har på deformasjon og orientering av jordkloden.

Jordklodens flattrykning ved polene og overflatens topografi medfører at målestedenes avstand fra jordsentret kan variere med noen km. Den lokale verdien av  $g$  påvirkes i annen desimal. Regionale og lokale variasjoner i massetettheten gir endringer som er minst en størrelsesorden mindre og påvirker i tredje og fjerde desimal av  $g$ . Jordklodens deformasjon med tiden på grunn av variasjonene i gravitasjonskrefter fra sola og månen gir endringer som er sammensatt av mange periodiske komponenter. I Norge er denne effekten typisk på  $0,000001 \text{ ms}^{-2}$  og fremstår som en kvasiperiodisk variasjon med amplitude på om lag  $100 \mu\text{Gal}$ . Landhevningen etter siste istid gir en sekulær reduksjon av  $g$  med tiden på ca.  $1 \mu\text{Gal}$  pr. år eller mindre, avhengig av hvor i Norge man måler.

Tyngdens akselerasjon bestemmes empirisk ved å betrakte oppførselen til en testmasse. Instrumenter av forskjellig konstruksjon benytter vektarm og fjærvektprinsipp, fritt fall og tidsmåling, eller svingetid for en fysisk pendel. Dersom testmassen er en satellitt i bane rundt jorden, kan gravitasjonsfeltets egenskaper avledes fra endringer i banen med tiden. Dedikerte satellitter for bestemmelse av gravitasjonsfeltet benytter relative posisjonsendringer i banen eller følsomme akselerometre som registrerer kontinuerlig.

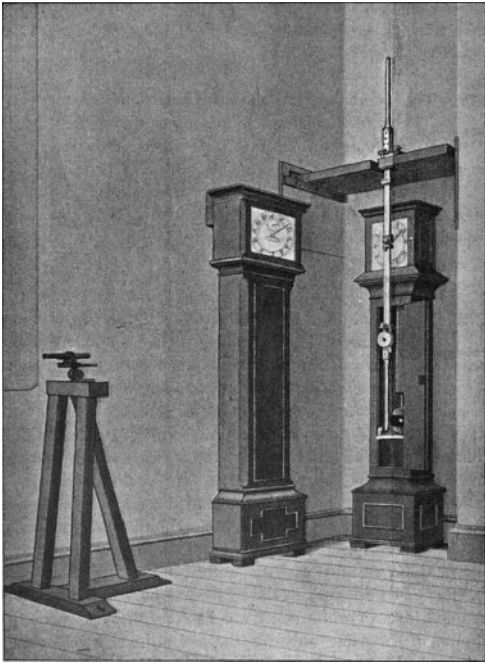
Grunnlaget for gravimetri ble lagt på 1600-tallet. Galileo Galilei eksperimenterte med fritt fall og pendelsvingninger av faste legemer. De avledede lovmessighetene lå til grunn for Christian Huygens teori for den matematiske og fysiske pendel, og for hans utvikling av det første pendeluret. Under antagelsen av at tyngdens akselerasjon var en konstant, foreslo Huygens i 1664 at lengden av en sekundpendel kunne være en universell lengde-enhet. Bare ti år senere oppdaget Jean Richer at tyngdens akselerasjon varierte med stedets breddegrad. Omtrent samtidig innså Isaac Newton at fritt fall var et gravitasjonsfenomen av samme type som planetbevegelse. Johannes Kepler avdekket lovmessigheter for planeters bevegelse ved hjelp av lange astronomiske observasjons-

rekker foretatt av Tycho Brahe. På dette grunnlaget utledet Newton en gravitasjonslov i 1687. Ved forskjellige teoretiske betraktninger av hydrostatisk likevekt kom både Newton og Huygens til at jordkloden måtte være flattrykt ved polene. Utover på 1700-tallet ble det teoretiske arbeidet videreført av P. Bouguer, C. MacLaurin og L. Euler. A. C. Clairaut (1743) tilrettela teorien for anvendelse av tyngdemålinger i geodesi. Han fant blant annet en formel som knyttet jordens flattrykning direkte til tyngdeverdiene ved polen og ekvator.

### De første pendelmålingene

Den første teknologiske milepelen i gravimetri er knyttet til Johann Bohnenbergers prinsipp for en reversibel pendel i 1811. Det er en fysisk pendel med to opphengningspunkter, justert slik at svingeperioden er lik i begge opphengninger. Derved unngår man å måtte bestemme massemiddepunktet for pendelen. Henry Kater konstruerte det første instrumentet i England i 1818. En fysisk pendel av messing hadde en fast testmasse på 1 kg og en justerbar masse på 32 g. De to endene av den 1 m lange pendelen var forsynt med knivegger slik at den kunne svinge i to motsatte opphengninger, altså reverseres. Posisjonsjustering av den lille massen hadde til hensikt å gi samme svingetid på de to eksperimentene. Katers demonstrasjoner i London ga usikkerheter på  $\pm 0,0004 \text{ ms}^{-2}$  [=  $\pm 40 \text{ mGal}$ ] for tyngdens akselerasjon  $g$  og etablerte den fysiske pendelen som et gravimeter (Torge 1989:6). Et sted i London ble valgt for referanseobservasjoner og verdien av  $g$  ble bestemt ved gjentatte måleserier. Det ble så laget invariable pendler som ble benyttet til relativ bestemmelse av tyngdeforskjeller mellom London og andre stasjoner. Målinger ble foretatt flere steder i verden på ekspedisjoner med britiske og franske fartøy.

Edward Sabine var britisk marineoffiser og naturforsker. Under en ekspedisjon med skipet «The Griper» i Nord-Atlanteren gjorde han i 1823 de første tyngdebestemmelser i Norge med Katers invariable pendel. Før etter ekspedisjonen ble svingetiden for to pendler bestemt på referansestedet i London. Sabine (1825) kom til Hammerfest den



Figur 1: Katers pendel

4.juni 1823 og etablerte et midlertidig observatorium på bart grunnfjell på Fuglenes. Små trebygninger ble kledd utvendig med seilduk og jord et stykke oppover veggen for å sikre at vinden ikke påvirket instrumentene. Til kontroll med tidsmålingen gjorde Sabine astronomiske observasjoner av sol og stjerner med et passasjeinstrument laget av Dollond. Pendelapparatet ble oppstilt i et eget hus 9 m over havnivå. Svingetiden til de to pendlene ble bestemt fra 27 måleserier mellom den 9. og 22.juni 1823.

Etter besøk på Grønland og Svalbard, hvor Sabine målte med pendelapparatet ved det som i dag kalles Indre Norskøya, kom ekspedisjonsskipet til Trondheim den 8.oktober 1823. Ved hjelp av den britiske konsul i byen fikk Sabine stille opp sine instrumenter i et bolighus et par km nord for sentrum. Han fikk tillatelse til å fjerne gulvet i et rom i første etasje slik at pendelapparatet og pendeluret kunne fundamenteres direkte på bakken for å unngå vibrasjoner fra bygningen. Et midlertidig astronomisk observatorium ble satt opp i hagen utenfor huset. En norsk ingeniøroffiser foretok trigonometrisk

bestemmelse av pendelapparatets høyde over midlere havnivå til 37 m. Svingetiden til de to pendlene ble bestemt fra 31 måleserier mellom 16.oktober og 1.november 1823.

Etter at ekspedisjonsskipet returnerte til England gjorde Sabine flere måleserier på referansestedet i London, blant annet for å bestemme hvordan temperaturen påvirket observasjonene. Etter å ha korrigert observasjonene for ytre påvirkninger og nedført resultatet til midlere havnivå på observasjonsstedet kom Sabine (1825:333) fram til følgende lengder for en sekundpendel:

Trondheim: 39,17456 engelske tommer  
 Hammerfest: 39,19519 engelske tommer

Vi har omregnet disse verdiene til tyngdens akselerasjon og ført verdiene inn i tabell 2 (kolonne 2).

I Sabine (1825:351) sammenstilles datidens observasjoner for hele kloden til en gravimetrisk bestemmelse av jordens flattrykning på 1:289. Datidens gradmålinger hadde gitt mellom 1:306 og 1:312. (jfr. Hansteen 1825).

### Norske pendelmålinger

Etter 1830 stoppet observasjonsarbeidet opp. Forsøk på å forbedre måleteknikken lyktes ikke før Robert von Sterneck i Wien miniaturiserte pendelinstrumentet i 1890-årene. En kort pendel på 25 cm ble benyttet til å bestemme tyngdeforskjeller mellom stasjonene ved å måle forskjeller i svingetid over noen timer. Presisjonen var typisk på  $\pm 0,0002 \text{ ms}^{-2}$  [=  $\pm 20 \text{ mGal}$ ], på de beste stedene  $\pm 0,00005 \text{ ms}^{-2}$  [=  $\pm 5 \text{ mGal}$ ] (Torge 1989:9). Til å begynne med ble en referanseverdi for Wien benyttet fordi alle instrumenter fra Sterneck gjorde målinger i Wien før avlevering. Etter lange måleserier i Potsdam ble en ny referanseverdi for denne stasjonen benyttet 1909–1971 (Kühnen og Furtwängler 1906).

Fysikkprofessor E. O. Schiøtz ved Universitetet i Oslo anskaffet et instrument med fire pendler (produksjonsnr. 19–22) fra Sterneck i 1892, betalt av den norske gradmålingskommisjonen. Det ble også anskaffet et instrument med to pendler (produksjonsnr. 33–34) til Fridtjof Nansens Fram-ekspedisjon til

Nordishavet. Et nasjonalt referansepunkt for tyngde ble etablert i Observatoriet i Oslo.

Norge var ett av 13 land som var med fra begynnelsen i 1862 da den mellemeuropeiske gradmåling ble lansert som et prosjekt for å bedre bestemmelsen av jordellipsoiden og undersøke dens avvik fra jordens egentlige form. Prosjektet ble i løpet av få år utvidet til å omfatte Europa. I 1887 ble navnet endret til den internasjonale gradmåling. Etter første verdenskrig ble organisasjonen del av International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) og tok navnet International Association of Geodesy (IAG). Sistnevnte feiret 150 års jubileum i 2013.

Den norske deltakelsen startet som et samarbeid mellom NGO og Observatoriet i Oslo. I 1863 ble presise basislinjer etablert og en meridianrekke fra Oslo til Levanger påbegynt. Orienteringen ble fastlagt ved astronomiske observasjoner i utvalgte punkter. I 1865 ble lengdegradforskjellene mellom Oslo, Stockholm og København bestemt astronomisk ved hjelp av telegrafisk overføring av tidssignaler (Pettersen 2007). Stortinget bevilget midler til prosjektet flere ganger og i 1876 ble den norske gradmålingskommisjonen opprettet. Den fikk ansvaret for etablering av de første tidevannsmålerne i 1880-årene, som skulle gi nullpunkt for høydebestemmelse ved nivellement. Et nasjonalt høydesystem (og dets videre forankring internasjonalt) kunne bare realiseres i forhold til en referanseflate som hadde egenskapene til en potensialflate. Relativ høydebestemmelse ved nivellement måtte kombineres med kjennskap til tyngdefeltet.



Figur 2: Gradmålingskommisjonens pendelapparat anskaffet fra Sterneck i 1892. Instrumentet er utstilt på Norsk kartmuseum i Kartverket på Hønefoss.

Før Schiøtz la ut på sommerekspedisjoner i 1892, 1893 og 1894 gjorde han målinger på Observatoriet i Oslo. Tabell 1 gir verdier for tyngdens akselerasjon fra de beste måleseriene, basert på utgangsverdiene for hver pendel målt av Sterneck i Wien. Middelerdien er  $9,81959 \pm 0,00009 \text{ m s}^{-2}$ . Vi bemerker en økende trend med tiden.

Tabell 1: Tyngdebestemmelse på Observatoriet i Oslo med gradmålingens instrument.

Observasjonsintervall	$g \text{ [m s}^{-2}\text{]}$
19.–21.juli 1892	$9,81950 \pm 0,00015$
8.–15.september 1892	$9,81949 \pm 0,00003$
22.–23.juni 1893	$9,81954 \pm 0,00015$
23.–25.juni 1893	$9,81965 \pm 0,00014$
8.–22.september 1893	$9,81967 \pm 0,00016$
5.–17.juni 1894	$9,81970 \pm 0,00017$

Schiøtz (1894) påviste at sterk vind påvirket målingene, selv når de ble foretatt inne i solide bygninger. Også ytre påvirkninger fra anleggsarbeid eller bakkevibrasjoner fra trafikk i nærheten hadde umiddelbar effekt. Det er mulig at slitasje på pendlenes knivegg kan ha ført til systematisk endring med tiden. Den er i tilfelle sammenlignbar med måleusikkerheten.

Schiøtz (1893, 1894, 1895) bestemte tyngdens akselerasjon på seks steder i Nord-Norge (Vadsø, Mehamn, Gjesvær på Magerøya, Hammerfest, Alta, Tromsø) og ti steder i Sør-Norge (Observatoriet i Bergen, Leirvik på Stord, Stavanger, Flekkefjord, Oksøy ved Kristiansand, Risør, Marinens observatorium i Stavern, Ekeberg, Hamar, Koppang).

Helmert (1901) benyttet 1400 observasjoner redusert til havnivå for å bestemme en flattrykning på 1:298,3. Det ga en formel for normaltyngde justert til Potsdamsystemet som var i bruk et godt stykke inn på 1900-tallet.

I 1954 gikk IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) inn for at det skulle etableres en europeisk kalibreringslinje for tyngde mellom Roma og Hammerfest. NGO (Norges geografiske oppmåling) fikk låne et moderne pendelapparat fra Universitetet i Cambridge. Gunnar Jelstrup (1957) gjorde pendelmålinger i England, Tyskland, Danmark og Norge. Referanseverdien tok han for en stasjon i Tyskland (i Potsdamsystemet) og avledet verdier for tyngdens akselerasjon i Oslo, Bodø og Hammerfest.

### Pendelmålingene i moderne lys

Noen av pendelobservasjonene til Sabine (1825), Schiøtz (1893, 1894, 1895) og Jelstrup (1957) er gjennomført på steder der det i de senere år er foretatt observasjoner med NMBUs absoluttgravimeter. Siden det gir  $g$ -verdien i absolutte fysiske enheter og dessuten er tusen ganger mer følsomt enn pendelinstrumentene gir det anledning til å undersøke nøyaktigheten i de historiske observasjonene. Tabell 2 angir verdier av tyngdens akselerasjon for 8 steder i Norge. Målingene er vanligvis ikke utført på samme observasjonssted. Derfor er måleresultatene nedført til geoiden på stedet ved korleksjon for ortometrisk høyde.

Sabines (1825) verdier er beregnet med utgangspunkt i en referanseverdi for London. Forskjellen til de moderne verdiene (kolonne 5) for Hammerfest og Trondheim er  $-96 \pm 26$  mGal. Verdiene til Schiøtz (1894, 1895) er beregnet i forhold til Wien. Den angitte usikkerheten (kolonne 3) er standardavviket av de måleseriene Schiøtz oppgir med hver pendel, typisk 10–20 mGal. Avvikene fra de moderne verdiene (kolonne 5) er  $36 \pm 22$  mGal. To av stasjonene har store utslag (Bergen og Gjesvær), men her ligger den historiske og den moderne stasjonen langt fra hverandre geografisk. Avgrensner vi dataene til de fire stedene som har nærliggende stasjoner (Stavanger, Oslo, Tromsø, Hammerfest) blir avvikene mellom Schiøtz og moderne verdier  $43 \pm 5$  mGal. Måleresultatene til både Sabine og Schiøtz er sterkest påvirket av systematiske effekter knyttet til de respektive referanseverdiene. Presisjonen har bedret seg fra Katers til Sternecks pendel.

NGO (1939) opprettet en ny referansestasjon for tyngde i kjelleren på Universitetets Geologiske Museum i 1933. Det var da bestemt at astronomene skulle fraflytte Observatoriet året etter. Gunnar Jelstrup gjorde flere tekniske modifikasjoner på Gradmålingens Sterneck-instrument og målte både i Oslo og Potsdam. Redusert til havnivå, fant han  $g=9,81934$  m s<sup>-2</sup> (i Potsdamsystemet) for Oslo.

Pendelinstrumentenes konstruksjon ble etter hvert mer sofistikert. De ble forsynt med to pendler som svingte i motfase i et vakuumkammer, og messing ble byttet ut med invar eller kvarts. Registreringene ble foretatt fotografisk i stedet for visuelt. Etter hvert kom presisjonen ned i  $\pm 0,00001$  ms<sup>-2</sup>. Slike instrumenter var kostbare i anskaffelse.

Jelstrups pendelobservasjoner i 1955 i Oslo, Bodø og Hammerfest er nedført til midlere havnivå og angitt i Tabell 2 (kolonne 4). Måleusikkerheten for hver stasjon er  $\pm 0,000007$  ms<sup>-2</sup> ( $\pm 0,7$  mGal). Avviket til de moderne absoluttbestemmelsene er  $14,3 \pm 0,6$  mGal og reflekterer feilen i absoluttverdi for Potsdam. En ny måleserie ble gjennomført i Potsdam i 1968–69 med 10 ganger bedre nøyaktighet enn bestemmelsen fra 1898–1904 (Schüler et al. 1971). Referanseverdien ble redusert med 13,9 mGal.

Dette er siste gang pendelinstrumenter ble benyttet i Norge. Internasjonalt gikk de ut av bruk fordi relative gravimetre basert

på fjærvektprinsippet var både enklere og raskere i bruk, og oppnådde bedre presisjon.

Tabell 2: Historiske og moderne tyngdeverdier referert til geoiden

Sted	Sabine (1825)	Schiøtz (1894, 1895)	Jelstrup (1957)	Absolutt g-verdi (NMBU)	Breddegrad
Stavanger		9,81888 (±18)			58° 58'
Randaberg				9,81850	59° 01'
Oslo		9,81966 (± 9)	9,81936	9,81922	59° 55'
Leirvik, Stord		9,81979 (±15)			59° 47'
Bergen Obs.		9,81971 (±15)			60° 24'
Kolsnes				9,81974	60° 34'
Trondheim	9,82041			9,82155	63° 28'
Bodø			9,82390	9,82376	
Tromsø		9,82611 (±15)		9,82572	69° 40'
Hammerfest	9,82559	9,82670 (±12)	9,82636	9,82621	70° 40'
Honningsvåg				9,82665	70° 59'
Gjesvær		9,82729 (±26)			71° 06'

### Relative tyngdemålinger

Observasjoner med relativgravimetre basert på fjærvektprinsippet begynte i Norge umiddelbart etter annen verdenskrig (Trovaag og Jelstrup 1950). Gunnar Nørgaard benyttet fly og to instrumenter av egen konstruksjon til å overføre tyngdeverdier fra København til Oslo i 1946. Han fant  $g=9,819362 \text{ m s}^{-2}$  (i Potsdamsystemet) redusert til midlere havnivå i Oslo. I 1947 anskaffet NGO sitt eget Nørgaard-gravimeter som straks ble benyttet for å knytte målinger i Oslo til referansestasjoner i Danmark, England og Sverige. Tyngdeforskjellene hadde standardavvik på  $\pm 0,00001 \text{ m s}^{-2}$  ( $= \pm 1 \text{ mGal}$ ). I Potsdamsystemet, redusert til midlere havnivå for Oslo, ble  $g=9,819378 \text{ m s}^{-2}$  (Trovaag og Jelstrup 1950). Ved å sammenligne med tyngdeforskjellen mellom Oslo og England, konkluderte de at absoluttverdien for Potsdam avvok med 13 mGal.

I 1953 anskaffet NGO et Worden-gravimeter fra USA. I februar 1957 ble det sammen med andre nordiske instrumenter med på den første SAS-flyvingen fra Oslo over nordpolen til Anchorage i Alaska (Sømod 1957b). Dette representerer den første overføringen



Figur 3: Nørgaard-gravimeter.

av tyngdeverdier fra Europa til USA. Ved å måle tyngdeforskjellen mellom pendelstasjonene i Oslo og Anchorage kunne absoluttverdien i Anchorage sammenlignes med overført verdi fra Oslo. Forskjellen var 0,5 mGal.



Figur 4: Worden-gravimeter med transportbeholder, fra 1953. Instrumentet er utstilt på Norsk kartmuseum i Kartverket på Hønefoss.

Sommeren 1957 ble både Worden- og Nørsgaard-gravimetre benyttet av NGO til å måle i 101 nivellements punkter fra Oslo via Bodø til Hammerfest (Sømod 1957a). Avstanden mellom hvert målepunkt var 20–25 km. Transporten foregikk med bil. Hovedmålet med observasjonene var å bestemme

tyngdeforskjellen mellom de tre pendelstasjonene som var blitt målt med Cambridgependelen i 1955. Resultatene er gjengitt i Tabell 3. Worden-gravimeteret stemmer med pendelresultatene innenfor 0,2 mGal og er mer presist enn Nørsgaard-gravimeteret.

Tabell 3: Tyngdeforskjeller målt med to forskjellige typer gravimetre

	$\Delta g$ fra pendelmålinger	$\Delta g$ fra Worden	$\Delta g$ fra Nørsgaard
Hammerfest – Bodø	–244,95 mGal	–244,76 mGal	–239,75 mGal
Bodø – Oslo	–459,22 mGal	–459,41 mGal	–460,51 mGal

NGO benyttet Nørsgaard-gravimeteret til årlige målekampanjer omkring 1950 for å etablere et nasjonalt tyngdenett. Det ble målt 300–800 målepunkter hvert år, hovedsakelig ved nivellementsfastmerker. Noen stasjoner ble målt flere ganger og tjente som hovedtyngdestasjoner. I nettet syd for Trondheim ble presisjonen anslått til  $\pm 1$  mGal.

Fra 1953 benyttet NGO også et Worden-gravimeter. Det kunne avleses med høyere presisjon enn Nørsgaard-gravimeteret og ble hovedinstrumentet i de neste 10 årene. Da hadde NGO bestemt tyngdeverdien i ca. 5200 punkter i Norge.

I 1969 ble det etablert et formelt samarbeid mellom NGO og oppmålingsenheten i det amerikanske forsvaret. Målet var å gjennomføre tyngdemålinger i punkter jevnt fordelt over hele Norge. Amerikanerne bidro med instrumenter og økonomisk støtte til helikoptertransport. NGO planla og gjennomførte feltarbeidet. Observasjonsdataene ble bearbeidet av begge institusjoner. Det ble benyttet relativgravimetre fra LaCoste & Romberg i USA. De kunne avleses til noen få  $\mu$ Gal, men fjærsystemet hadde en drift med tiden som gjorde at alle måleserier måtte foretas i sløyfer. Det innebar at man startet



og avsluttet en måleserie i samme målepunkt. Det ble etablert 36 førsteordens tyngdepunkter (med sikringspunkt) i 1969, noenlunde jevnt geografisk fordelt over hele landet. De finnes ofte på flyplasser og ved trafikk-knutepunkter. Litt over 200 annenordens tyngdepunkter ble innmålt i forhold til førsteordenspunktene. De er tilgjengelig med bil og lå mindre enn 80 km fra hverandre. Dette feltarbeidet ble avsluttet i 1972. Disse målingene utgjør hovedpunktene i det nasjonale tyngdenettet (Harsson 1973,

1978). Med dem som utgangspunkt ble det etablert ett målepunkt pr. 100 km<sup>2</sup> i detaljnettet. Senere er dette betydelig fortettet. Feltarbeidet med detaljnettet pågikk til ut i 1990-årene. I 2013 består Kartverkets tyngdedatabase av 11800 målepunkter på norsk jord med tredimensjonal posisjonsangivelse. Det ble i stor utstrekning benyttet helikoptertransport under feltarbeidet. Da klarte man typisk 40 detaljpunkter om dagen. Med bil klarte man opptil 20 punkter pr. dag, til fots sjelden mer enn 5.



Figur 5: LaCoste & Romberg-gravimeter i felt i 1974 (foto: Bjørn Geirr Harsson).

Da en europeisk geoidmodell skulle beregnes av universitetet i Hannover bidro Kartverket med tyngdemålinger ved nivellimentsfastmerker langs de utvalgte hovedlinjene. Spesielle problemstillinger knyttet til geoidebestemmelse i områder med sterkt varierende topografi ble tatt opp av Omang (2000).

Kartverket har også etablert lokale tyngdenett i Arktis. Etter et vulkanutbrudd på Jan Mayen i 1970 ble det etablert geofysiske målestasjoner på øya. NGO opprettet et gravimetrisk hovedpunkt ved flyplassen på Jan Mayen sommeren 1973. Dette punktet ble

knyttet til det nasjonale førsteordensnettet. Året etter ble det etablert et tyngdenett sydvest for Beerenberg-vulkanen. Dette nettet ble repeterende målt i 1976 og 1979. Observasjonene påviste ingen signifikante endringer. I 1978 ble Svalbard knyttet til det nasjonale førsteordensnettet, og et tyngdenett på Svalbard ble etablert i 1980-årene. Den første absoluttmålingen av tyngde i Ny-Ålesund ble gjort i 1991.

Da det store vannkraftreservoaret Blåsjø i Sør-Norge skulle demmes opp ble det skapt en innsjø som rommet 3 milliarder tonn vann. Det vakte internasjonal interesse for å



undersøke hvordan denne tyngden ville deformere jordoverflaten i området. Kartverket, NOR SAR og universitetene i Bergen, Berlin og Darmstadt samarbeidet om en stor kartlegging med mange geofysiske og geodetiske instrumenter. Blåsjørapporten (Harrison og Bungum 1992) viste en innsynkning av jordskorpen med 3 cm i vannreservoaret og en liten oppstuvning noen km utenfor.

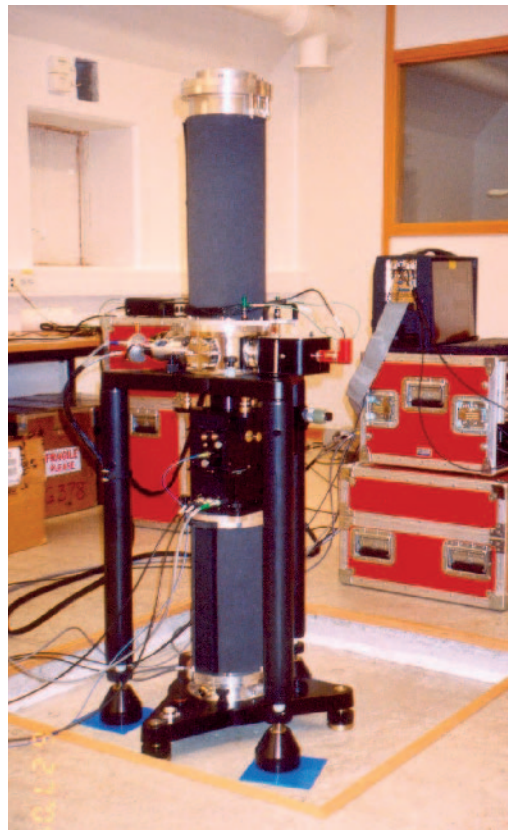
Langsomme deformasjoner på grunn av landhevningen i Norden etter siste istid har vært kartlagt i prosjekter koordinert av NKG (Nordisk kommisjon for geodesi). Tyngden har vært målt repeterende langs såkalte landhevninglinjer som går øst-vest gjennom de nordiske land på breddegradene 56°, 61°, 63° og 65° N. Den best observerte er 63°-linjen som er målt 8 ganger siden 1968. Det er benyttet flere instrumenter og observatører. Målingene avdekker at maksimal endring i tyngden med tiden følger den geometriske modellen for landhevningen med et maksimum ved Kramfors i Sverige.

Et av Kartverkets LaCoste & Romberg-gravimetre ble teknisk modifisert i 1994 til å registrere tyngden med høy tidsoppløsning. Det har vært oppstilt flere steder for å observere tidsserier over flere måneder til bestemmelse av periodisitetene i tidejordsvariasjonen.

### Absolutte målinger med fritt fall gravimetre

Det første besøket i Norge av et absoluttgravimetre representeres av en måling med et italiensk instrument i Hammerfest i 1976 (Cannizzo et al. 1978). Resultatet ble mangelfullt fordi korreksjoner for polbevegelse og atmosfærens trykk ikke ble påført. Neste anledning oppsto i 1991–92 da et finsk JILA-instrument målte i Stavanger, Trysil og Tromsø i et samarbeid med Kartverket. Slike instrumenter hadde en målenøyaktighet på  $\pm 10 \mu\text{Gal}$  eller bedre. I 1993 var en rekonstruert og forbedret versjon kommersialisert. FG5-101 kom fra Tyskland og FG5-102 fra USA, med Kartverket som koordinator. Det ble målt i Stavanger, Hønefoss, Trysil og Tromsø. Målenøyaktigheten var  $\pm 2 \mu\text{Gal}$ . Oppfølgende målinger ble gjort i 1995 og 1998.

I 2004 anskaffet Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) absoluttgravimeteret FG5-226. Det ble satt inn i årlige målekampanjer for å videreføre de påbegynte tidsseriene og øke antall målestasjoner i Norge. Den gode målenøyaktigheten på  $\pm 2 \mu\text{Gal}$  gjorde det mulig å konfrontere globale modeller for tidevannets belastning på norske kyststasjoner og å utvikle forbedrede regionale modeller for korreksjon for denne effekten (Lysaker et al. 2008, Breili 2009a, b). Tidsserier over flere år i Trysil avslørte sesongvariasjoner i tyngdekraften på grunn av varierende nedbør og grunnvannstand, og på grunn av belastning på jordoverflaten fra snø. Sistnevnte effekt var detekterbar både fra lokale masseendringer rundt observasjonsstedet, men også som en regional belastningseffekt fra den snøen som dekket hele Sør-Norge (Breili og Pettersen 2009).



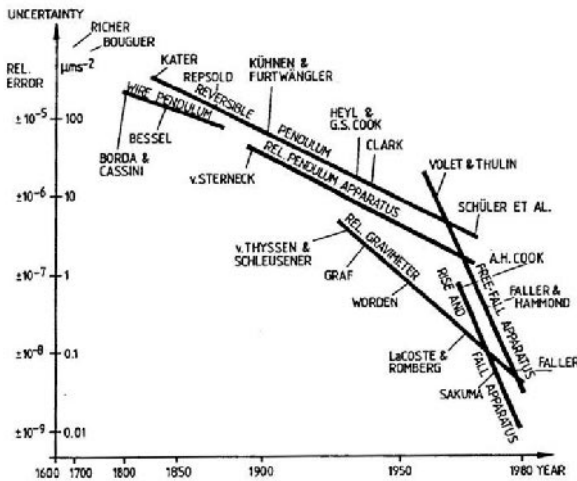
Figur 6: Absoluttgravimeter FG5-226 tilhørende NMBU.

Når det korrigeres for kortperiodiske og sesongmessige variasjoner i tidsseriene, fremkommer sekulære endringer i tyngdekraften av forskjellig styrke på forskjellige steder i Norge. Landhevningen etter siste istid løfter jordoverflaten som en viskoelastisk reaksjon på at de tidligere store ismassene har smeltet bort for 10.000 år siden. I Fennoskandia er denne effekten minst langs norskekysten og størst innerst i Bottenvika, siden hele området i sin tid var dekket av ismasser. Ved å sammenligne endringen i tyngde med geometriske høyde-endringer kan man vinne inn-sikt i de geodynamiske fenomener som finner sted i jordens indre (Pettersen 2011).

Det omfattende observasjonsprogrammet gjorde det mulig å velge ut de mest nøyaktige resultatene for hvert sted. Et nasjonalt nett

av 16 observasjonssteder med tyngdens akselerasjon bestemt til bedre enn 3–4  $\mu\text{Gal}$  og endring på mindre enn  $-1 \mu\text{Gal}/\text{år}$  utgjør den mest nøyaktige referansen for tyngde i Norge (Breili et al. 2010).

Et superledende gravimeter har registrert tidsvariasjonen i tyngdens akselerasjon på et fast observasjonssted i Ny Ålesund på Svalbard siden 1999. Fra tid til annen har samtidige målinger vært utført med absoluttgravimeter. Det har ført til en kalibrert tidsserie på 9 år som viser både sesongvariasjoner og trender over flere år (Omang og Kirerulf 2011). Det har vært tolket som deteksjon av viskoelastisk landhevning fra siste istid overlignet en umiddelbar elastisk landhevning forårsaket av dagens massetap fra isbreene på Svalbard.



Figur 7: Forbedring over tid av de forskjellige observasjonsmetoder i gravimetri.

### Tyngdemålinger til havs

De to pendlene som ble anskaffet til Fram-ekspedisjonen ankom Oslo sommeren 1892, etter at svingetiden var blitt bestemt i Wien. Schiøtz (1894, 1901) gjorde måleserier på Observatoriet i Oslo i juli 1892, repeterte

dem i juni 1893 før Frams avreise og i mai/juni 1897 etter at Fram var returnert til Oslo (Tabell 3). Middelveidien er  $9,81950 \pm 0,00010 \text{ ms}^{-2}$ . Det er ingen forskjell før og etter ekspedisjonen.

Tabell 3: Tyngdebestemmelse på Observatoriet i Oslo med Fram-ekspedisjonens instrument.

Observasjonsintervall	$g \text{ [m s}^{-2}\text{]}$
21.–25.juli 1892	$9,81949 \pm 0,00013$
11.juni 1893	$9,81948 \pm 0,00012$
30.mai og 13.juni 1897	$9,81953 \pm 0,00009$

Ombord i Fram gjorde Sigurd Scott-Hansen flere måleserier i løpet av ekspedisjonens skipet var innefrosset i isen. Resultatene er gitt i Tabell 4. Den store usikkerheten

på enkelte målinger synes å være knyttet til aktivitet i skruisen som forårsaket vibrasjoner i skipet.

Tabell 4: Verdens første tyngdemålinger til havs om bord i Fram 1894–1896.

Observasjonsdato	g [m s <sup>-2</sup> ]	Bemerkninger
16.januar 1894	9,82951 ± 0,00005	I Fram (# 33); 79° 15'
15.mars 1894	9,83028 ± 0,00010	I Fram (# 33); 79° 39'
8.–11.juni 1895	9,83214 ± 0,00055	På isen (# 33 & 34); 84° 40'
13. og 22.november 1895	9,83165 ± 0,00024	I Fram (# 33 & 34); 85° 50'
5.januar 1896	9,83197 ± 0,00009	I Fram (# 33); 84° 52'
28.–29.april 1896	9,83129 ± 0,00021	I Fram (# 33 & 34); 84° 13'

Henrik Mohn (1899) utviklet en metode for å avlede tyngden fra en termometerbestemmelse av kokepunktet for vann, korrigert for lufttrykket på stedet målt med et kvikksølvbarometer. Kokepunktet for en væske avhenger av både tyngden og lufttrykket på stedet. Med sistnevnte målt samtidig med bestemmelsen av temperaturen for kokepunktet, kunne tyngden avledes. Metoden ble benyttet av Hecker (1903) under en Atlanterhavs-krysning, og senere i det Indiske hav, Stillehavet og Svartehavet. I alt ble 250 observasjoner foretatt. Presisjonen ble anslått til ± 30 mGal.

I mellomkrigstiden utviklet Vening-Meinesz (1929, 1941) et to-pendels instrument for bevegelig plattform. NGO gjorde målinger langs kysten i 1957 og 1958 med et slikt instrument som ble lånt fra Danmark (Bakkelid 1959). Instrumentet ble oppstilt i ubåten KNM Utsira og gjorde målinger på utvalgte steder ca. 4 nautiske mil fra kysten fra Bergen til Hammerfest. Under observasjonene var ubåten neddykket 30–50 m. Alle pendelobservasjonene ble kalibrert av pendelobservasjoner og tyngdeverdi for referansestasjonen i Oslo. I 1957 ble 66 målesteder bestemt under vann mellom Bergen og Bodø. Etter toktet ble instrumentet justert på nytt. Det ble oppdaget feiljustering av visse komponenter. Usikkerhetsoverslagene antydte standardavvik på ± 10–20 mGal. I 1958 ble 45 målesteder bestemt under vann mellom Bodø og Hammerfest. En mer presis klokke var blitt anskaffet til dette toktet. Usikker-

hetsanslagene antydte standardavvik på ± 2–4 mGal.

I samarbeid med oppmålingsenheten i det amerikanske forsvaret gjorde NGO tyngdemålinger langs norskekysten og ved Svalbard i 1970–72 og i 1986–87. Under det siste av disse prosjektene ble et LaCoste & Romberg sjøgravimeter lånt fra Universitetet i Bergen og plassert om bord i Sjøkartverkets skip Lance. Målelinjer ble utført helt til 81° N, og dekket kystnære områder langs Norge og Svalbard.

I 2006 startet Mareano, et samarbeidsprosjekt mellom Norges geologiske undersøkelser, Statens kartverk og Havforskningsinstituttet. Formålet var å foreta en tverrfaglig kartlegging av havbunnen i norske kyst- og havområder. Fra 2008 ble også tyngdemåling inkludert i prosjektet. Det ble benyttet et skipsgravimeter fra USA som under normale observasjonsforhold ga et standardavvik på ± 1 mGal. Fra Trondheimsfjorden og sørover er det målt med sjøgravimeter i alle de store fjordene. Også innsjøen Mjøsa ble tyngdemålt.

### Tyngdemåling fra fly

I 1990-årene muliggjorde finansiering fra EU flere internasjonale samarbeidsprosjekter som benyttet fly til observasjonsarbeidet. Et relativgravimeter fra LaCoste & Romberg, S-99 tilhørende Universitetet i Bergen, ble montert på tregheitsplattform for måling av relative endringer i tyngdekraften fra luf-

ten (Forsberg et al. 1998, Timmen et al. 2000). Målingene hadde et standardavvik på ca.  $\pm 2$  mGal (Omang et al. 2007) og dekket store arealer på kort tid. Et forsøksprosjekt i Skagerak i 1996 med Kartverket som norsk deltaker ga lovende resultater. I 1998 ble flygravimetri utført langs kysten av Grønland og ved Svalbard i et samarbeid med Kort- og Matrikelstyrelsen i Danmark (Gidskehaug et al. 1999). Ytterligere målinger ved Svalbard ble gjort i 1999 og 2001. I 2003 ble koordinerte observasjoner gjennomført med finansiering av EU og Norges forskningsråd i havområdene mellom Norge, Svalbard, Grønland og Island (Solheim et al. 2007). I tillegg til å fremskaffe observasjoner i nye områder var hensikten å knytte sammen eksisterende sjøgravimetrisk data ved å sammenligne med de flygravimetrisk resultatene. Datasettet ble analysert for å bestemme strømningsforholdene i Framstredet ved Svalbard (Lysaker 2009 a, b).

### Gravitasjonsmålinger fra satellitt

NASAs tvillingssatellitt GRACE har foretatt repeterte bestemmelser av jordens globale gravitasjonsfelt siden 2002. Målingene viser regionale endringer i geoiden på grunn av sesongvariasjoner i nedbør, flom, avsmelting fra isbreer, postglasial landhevning og et jordskjelv i havet utenfor Sumatra i 2004. Breili (2011) har analysert tidsserier av gravitasjonsfeltet fra GRACE og påvist variasjoner i et område med sentrum i Trysil som stemmer særdeles bra med de observasjonene som er foretatt på stedet med absoluttgravimeter. Bentel (2013) tar også utgangspunkt i GRACE-data og har modellert endringer i isbreers masse med nye metoder for regional tyngdefeltberegning. Omfattende numeriske beregninger ligger til grunn for valg av radielle basisfunksjoner ved regional tyngdefeltberegning for å oppnå best mulig oppløsningsevne med data fra GRACE (Bentel et al. 2013). I et videre aspekt har Ophaug (2013) sammenlignet tre metoders egnethet for regional geoideberegning. Metodene er ekvivalente i det globale tilfellet.

GOCE-satellitten har målt jordens gravitasjonsfelt med bedre presisjon og romlig oppløsning enn noen annen satellitt. Det ble

innsamlet data fra september 2009 til november 2013. Dataene er homogent fordelt over jordkloden med unntak av områder nær polpunktene. Gradiometeret om bord er utviklet teknologi og det var derfor av betydning at resultatene ble validert mot uavhengige observasjoner på bakken. UMB påtok seg denne oppgaven med finansiering fra Romforskningsprogrammet i Norges forskningsråd. Det ble utviklet beregningsstrategier og programvare for valideringsprosedyrer slik at hele kjeden fra observasjon via data-prosessering til beregning av globale tyngdefeltmodeller kunne underkastes kontroll. De beste tyngdedataene fra den nasjonale tyngdedatabasen ble kalibrert ved hjelp av UMBs absoluttgravimeter som observerte samtidig med GOCE. Vi benyttet også Kartverkets databaser for loddavvik i Norge og for GPS-nivellement. Geoidehøyder ble avledet fra flere regionale og globale geoidmodeller. Valideringsberegninger konfronterte GOCE-resultatene med bakkedataene, både på geoiden og i satellittens banehøyde (Gerlach et al. 2013, Mysen 2014, Sprlak 2012, Sprlak et al. 2012).

### Oppsummering

I et forsøk på å bestemme jordklodens flattrykning på grunnlag av Clairauts formel, ble det gjort tyngdemålinger med pendelapparat i Norge allerede i 1823. Pendelinstrumenter dominerte gravimetrien i nesten 150 år, både til relative og absolutte tyngdebestemmelser. Både presisjon og operasjonell effektivitet ble bedret da relative gravimetre basert på fjærvektsprinsippet ble tatt i bruk etter annen verdenskrig. Kalibrering til absolutte verdier ble nøyaktig etter 2004 da absolutte gravimetre ble satt inn for å bestemme tidsvariasjonene i tyngdefeltet i Norge.

De første tyngdemålinger til havs ble utført i 1894 da polarskuta Fram var innefrosset i Nordishavet. En indirekte metode utviklet ved Universitetet i Oslo ble benyttet i årene før første verdenskrig til tyngdebestemmelser på verdenshavene. I siste halvdel av det 20. århundre ble store havområder utenfor Norge og i Arktis målt fra skip og fly. Det samlede datasettet ble benyttet til å beregne geoide modeller for det nordiske området. Det inn-

gikk også i flere vitenskapelige undersøkelser etter 2000 med problemstillinger innenfor geodesi, geofysikk, oseanografi og ved validering av satellittgravimetrisk observasjoner. I de siste årene er problemstillinger knyttet til massetap fra isbreer og klimavariasjoner på kort og lang tidsskala tatt opp.

## Referanser

- Bakkeliid, S., 1959, Gravity observations in a submarine along the Norwegian coast. Norges geografiske oppmåling, geodetiske arbeider nr. 11.
- Bentel, K., 2013, Regional gravity modeling in spherical radial basis functions – on the role of the basis function and the combination of different observation types. . Ph.D. dissertation UMB 2013:58. ISSN 1503–1667.
- Bentel, K., Schmidt, M., Gerlach, C., 2013, Different radial basis functions and their applicability for regional gravity field representation on the sphere. *International Journal of Geomatics* **4**, 67–96.
- Breili, K., 2009a, Ocean tide loading at elevated coastal gravity stations. *Kart og Plan* **69** (3), 151–164.
- Breili, K., 2009b, Investigations of surface loads of the Earth – geometrical deformations and gravity changes. Ph.D. dissertation UMB 2009:25. ISSN 1503–1667.
- Breili, K., 2011, Absolutte tyngdemålinger i det 21. århundre. *Kart og Plan* **71**, 133–144.
- Breili, K., Pettersen, B. R., 2009, Effects of surface snow cover on gravimetric observations. *Journal of Geodynamics* **48**, 16–22.
- Breili, K., Gjevestad, J. G., Lysaker, D. I., Omang, O. C. D., Pettersen, B. R., 2010, Absolute gravity values in Norway. *Norwegian Journal of Geography* **64**, 79–84.
- Cannizzo, L., Cerutti, G., Marson, I., 1978, Absolute gravity measurements in Europe. *Il Nuovo Cimento*, Vol. 1C, No. 1, p. 39–85.
- Clairaut, A. C., 1743, *Théorie de la figure de la terre*. Paris.
- Forsberg, R., Olesen, A. V., Timmen, L., Nese-mann, M., Xu, G., Meyer, U., Boebel, T., Bastos, L., Cunha, S., Gidskehaug, A., Hehl, K., 1998, Geoid determination by airborne gravimetry – the AGMASCO project. Second joint meeting of the International Gravity Commission and the International Geoid Commission, September 7–12, 1998. Trieste.
- Gerlach, C., Sprlak, M., Bentel, K., Pettersen, B. R., 2013, Observation, validation, modeling – historical lines and recent results in Norwegian gravity field research. *Kart og Plan* **73**, 128–150.
- Gidskehaug, A., Hansen, V., Solheim, D., Fareilly, B., Forsberg, R., Olesen, A., Mjelde, R., 1999, Svalbard airborne gravity project 1998. In *Proceedings EAGE 61st Conference*, Helsinki.
- Hansteen, C., 1825, Capt. Sabines Pendel-Iagttagelser. *Magazin for Naturvidenskaberne* **6**, 309–310.
- Harsson, B. G., 1973, Måling av tyngdefeltet i Norge. *Kart og Plan* **33**, 207–212.
- Harsson, B. G., 1978, Beregning av det norske gravimeterbasissetet. Nordisk kommisjon for geodesi, Oslo.
- Harsson, B. G., Bungum, H., 1992, Multidisciplinary environmental monitoring of the Blåsjø reservoir area, Norway. *Statens kartverk, geodetic publications 1992:1*.
- Hecker, O., 1903, Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean, sowie in Rio de Janeiro, Lissabon und Madrid. *Veröff. Kgl. Preuss. Geod. Inst., Neue Folge Nr. 11*. Berlin.
- Helmert, F. R., 1901, *Der normale Theil der Schwerkraft im Meeresniveau*. *Sitz. Ber. Kgl. Preuss. Akad. der Wissenschaften zu Berlin*, 328–336.
- Jelstrup, G., 1957, Observations on the gravimetric calibration base Hammerfest-Munich with the Cambridge pendulum apparatus. *Norges geografiske oppmåling, geodetiske arbeider nr. 7*.
- Kühnen, F., Furtwängler, P., 1906, Bestimmung der absoluten Grösse der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln. *Veröff. Kgl. Preuss. Geod. Inst. Potsdam, Neue Folge Nr. 27*.
- Lysaker, D. I., 2007a, Mean dynamic topography and geostrophic surface currents in the Fram Strait derived from geodetic data. *Marine Geodesy* **32**, 42–63.
- Lysaker, D. I., 2007b, Gravity investigations at northern high latitudes. Ph.D. dissertation UMB 2009:14. ISSN 1503–1667.
- Lysaker, D. I., Breili, K., Pettersen, B. R., 2008, The gravitational effect of ocean tide loading at high latitude coastal stations in Norway. *Journal of Geodesy* **82**, 569–583.
- Mohn, H., 1899, *Das Hypsometer als Luftdruckskmessers und seine Anwendung zur Bestimmung der Schwerekorrektion*. *Skrifter, Videnskabs-selskabet i Christiania, Matem. Naturvid. Klasse*, bind 1899, No. 2.

- Mysen, E., 2013, GOCE quasigeoid performance for Norway. International Journal of applied earth observation and geoinformation. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.008>.
- NGO, 1939, Årsberetning for NGO 1939, side 8.
- Omang, O. C. D., 2000, The challenge of precise geoid determination – applied to Norwegian extremities: glaciers, fjords and mountains. Dr.scient.-dissertation NLH 2000:13. ISSN 0802-3220.
- Omang, O., Solheim, D., Hunegnaw, A., Lysaker, D., Ghazavi, K., Nahavanchi, H., 2007, OCTAS with a focus on the importance of a high accuracy geoid. In Gravity Field of the Earth, 13–18, General Command of Mapping, Turkey, no. 18.
- Omang, O. C. D., Kierulf, H. P., 2011, Past and present-day ice mass variation on Svalbard revealed by superconducting gravimeter and GPS measurements. Geophysical Research Letters **38**, L22304, doi:10.1029/2011GL049266.
- Ophaug, V., 2013, Regional gravity field modeling: A comparison of methods. Master's thesis UMB.
- Pettersen, B. R., 2007, Christopher Hansteens rolle i geodesiens utvikling i Norge. II. Vitenskapelige gradmålinger. Kart og Plan **67**, 38–46.
- Pettersen, B. R., 2011, The postglacial rebound signal of Fennoscandia observed by absolute gravimetry, GPS, and tide gauges. International Journal of Geophysics, doi: 10.1155/2011/957329.
- Sabine, E., 1825, An account of experiments to determine the figure of the Earth by means of the pendulum vibrating seconds in different latitudes. Utgitt av the Board of Longitude.
- Schiøtz, E. O., 1893, Referat af pendelforsøg 1892. Forhandlinger i Videnskabs-selskabet i Christiania aar 1892, s. 27–30.
- Schiøtz, E. O., 1894, Resultate der im Sommer 1893 in dem nördlichsten Theile Norwegens ausgeführten Pendelbeobachtungen. Utgitt av den norske gradmålingskommisjon.
- Schiøtz, E. O., 1895, Resultate der im Sommer 1894 in dem südlichsten Theile Norwegens ausgeführten Pendelbeobachtungen. Utgitt av den norske gradmålingskommisjon.
- Schiøtz, E. O., 1901, Results of the pendulum observations. In: The North Polar Expedition 1893–1896, Scientific Results Volume II (Ed. F. Nansen). J. Dybwad, Christiania.
- Schüler, R., Harnisch, G., Fischer, H., Frey, R., 1971, Absolute Schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam 1968–1969. Veröff. Zentralinst. für Physik der Erde Nr. 10.
- Solheim, D., Omang, O. C. D., Hunegnaw, A., Drange, H., Johannessen, J., Siegismund, F., Nahavanchi, H., Ghazavi, K., Pettersen, B. R., Lysaker, D. I., Gidskehaug, A., Plah, H.-P., 2007, The OCTAS project, the geoid, the mean sea surface and the mean dynamic topography. In Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International GOCE User Workshop, ESA SP-627.
- Sprlak, M., 2012, Validation of GOCE satellite gravity gradiometry products: Research opportunities. Kart og Plan **72**, 8–19.
- Sprlak, M., Gerlach, C., Pettersen, B. R., 2012, Validation of GOCE global gravity field models using terrestrial gravity data in Norway. Journal of Geodetic Science **2**, 134–143.
- Sømod, T., 1957a, European gravimetric calibration base. Norges geografiske oppmåling, geodetiske arbeider nr. 9.
- Sømod, T., 1957b, Gravimetric ties. Norges geografiske oppmåling, geodetiske arbeider nr. 10.
- Timmen, L., Bastos, L., Forsberg, R., Gidskehaug, A., Meyer, U., 2000, Airborne gravity field surveying for oceanography, geology, and geodesy – the experience from AGMASCO. In Geodesy beyond 2000 (ed. K. P. Schwarz), 118–123. Springer.
- Torge, W., 1989, Gravimetry. De Gruyter. Berlin. ISBN 3-11-010702-3.
- Trovaag, O., Jelstrup, G., 1950, Gravity comparisons. Utgitt av den norske gradmålingskommisjon og Norges geografiske oppmåling.
- Vening-Meinesz, F. A., 1929, 1941, Theory and practice of pendulum observations at sea. Vol. I og II. Publications of the Netherlands Geodetic Commission. Delft.