

Hvordan nye metoder gir oss ny viten

– bruk av *in situ* kosmogene nuklider i geofag



HENRIETTE LINGE OG
LARS EVJE

Innen mange fagfelt er det essensielt å kunne estimere tidspunkt for, og varighet og hyppighet av hendelser. For å kunne rekonstruere hendelsesforløp i fortiden er det grunnleggende å kunne organisere hendelser i riktig rekkefølge, altså kronologisk. Til dette trenger man metoder for relativ og numerisk aldersbestemmelse. En hyppig anvendt metode bruker kosmogene nuklider, og her skal vi forklare hvordan.

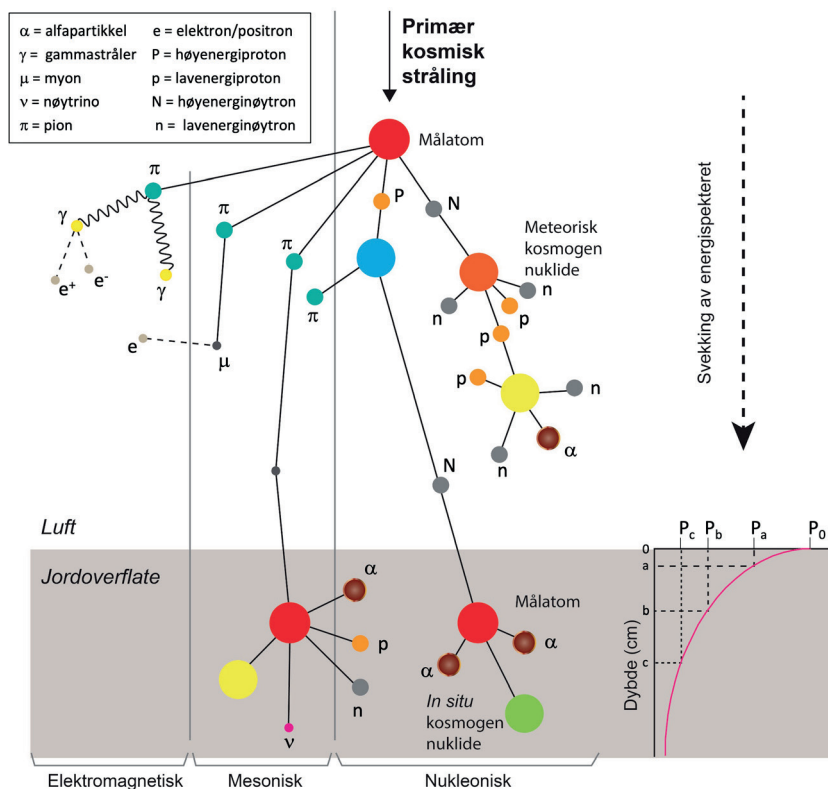
In situ kosmogene nuklider dannes i mineraler når kosmisk stråling treffer atomkjerner i de øverste meterne av jordens overflate. I teorien er slike nuklider derfor ideelle for å undersøke geologiske overflateprosesser som forvitring, erosjon og sedimentasjon. Siden sent på 1980-tallet har bruk av *in situ* kosmogene nuklider stått for noen av de mest betydelige fremskrittene i geofag. Mest brukt er *eksponeringsdatering*, hvor man kan estimere hvor lenge en steinflate har vært blottet for vær og vind.

Fig. 1 | Skjematisk fremstilling av kaskaden av partikler som dannes i atmosfæren av en galaktisk høyenergetisk partikkel (primær kosmisk stråling). Kaskaden består av tyngre (nukleoniske) og lettere (mesoniske) og elektromagnetiske "dusjer". Partikkelenergien i den kosmiske strålingen svekkes for hver kollisjon. Kollisjoner i atmosfæren danner meteoriske kosmogene nuklider, mens *in situ* kosmogene nuklider dannes i de øvre meterne av jordens overflate. Konsentrasjonen (rosa kurve) av kosmogene nuklider i overflaten avtar eksponentielt i de øvre 2-3 meter. P_0 er produksjonsraten til en gitt kosmogen nuklide i selve overflaten, mens P_{a-c} er produksjonen ved dybde a-c. Modifisert fra Dunai (2010) og Schaefer et al. (2022).

Ved UiB finnes Norges eneste prepareringslaboratorium for kosmogene nuklider – et laboratorium som nå danner grunnlaget for en bedre forståelse av det norske landskapets historie. Her gir vi noen eksempler på enkle og sammensatte eksponeringshistorier fra Sør-Norge.

Kosmisk stråling og kosmogene nuklider

Naturlige prosesser kan gi oss mål på geologisk tid dersom de fører til kvantifiserbare endringer med kjent hastighet. Galaktisk kosmisk stråling står bak en slik prosess. Primær kosmisk stråling, hovedsakelig høyenergetiske protoner fra supernovaer, treffer jordens øvre atmosfære og starter en dusj



eller kaskade av partikkelreaksjoner gjennom atmosfæren (figur 1). Dusjen kalles sekundær kosmisk stråling og består i hovedsak av nøytroner og myoner med høy energi. En partikkel med høy energi kan endre kjernen til et atom som det kolliderer med. Slik dannes *kosmogene nuklider*.¹ På veien gjennom jordens atmosfære svekkes partiklenes energi ved at de kolliderer og vekselvirker med målatomer og danner meteoriske kosmogene nuklider (figur 1). Atmosfæren skjermer dermed livet på jorden fra et vedvarende kosmisk bombardement. Kun noen få partikler har tilstrekkelig høy energi til å nå jordoverflaten. Der kan de vekselvirke med atomkjerner i mineraler, og det dannes *in situ* (= "på stedet") kosmogene nuklider² (figur 1). Galaktisk kosmisk stråling påvirkes til en viss grad av solaktivitet, men mest av alt av jordens magnetfelt. Variasjoner i sistnevnte modererer fluksen av kosmisk stråling som når jordoverflaten. Derfor varierer også den stedsspesifikke produksjonen av en gitt kosmogen nuklide over tid.

Kosmogene nuklider og tid

Dersom produksjonen av kosmogene nuklider ikke er konstant over tid, hvordan kan vi da bruke dem til aldersbestemmelse? Variasjon i fluks over tidsintervall på 1000–100 000 år er rekonstruert fra dyphavssedimenter og tas hensyn til når en produksjonsrate skaleres for en gitt geografisk og topografisk lokalisering. Kortvarige sykliske endringer (kortere enn 1000 år) er knyttet til solaktivitet, men disse kan i praksis neglisjeres for lengre tidsintervall.

To hovedbetingelser må oppfylles for at kosmogene nuklider skal kunne anvendes som dateringsverktøy. For det første må flaten som skal dateres, ha vært fri for målbare mengder kosmogene nuklider da den først ble eksponert for kosmisk stråling. Ettersom kosmisk stråling kan penetrere flere meter ned i bakken, vil blottede bergflater ofte inneholde små mengder av nedarvede kosmogene nuklider. Dette vil føre til en overestimert alder. Ved å analysere flere prøver fra samme lokalitet kan dette oppdages. Videre antas det at bergflater ikke eroderes når de først har blitt eksponert. Over tid vil imidlertid de fleste flater påvirkes av forvitring og erosjon. Vi ser dette tydelig i form av oppstikkende kvartsganger (figur 2) og ruglete steinflater hos grovkrystalline bergarter. Mineralkorn med kosmogene nuklider går altså tapt over tid. Dette vil gi underestimert alder. Det samme gjør periodevis overdekning av snø, is, vann, jord, mose eller sedimenter, som reduserer fluksen av kosmisk stråling.

Et eksempel på en kosmogen nuklide som mange kjenner

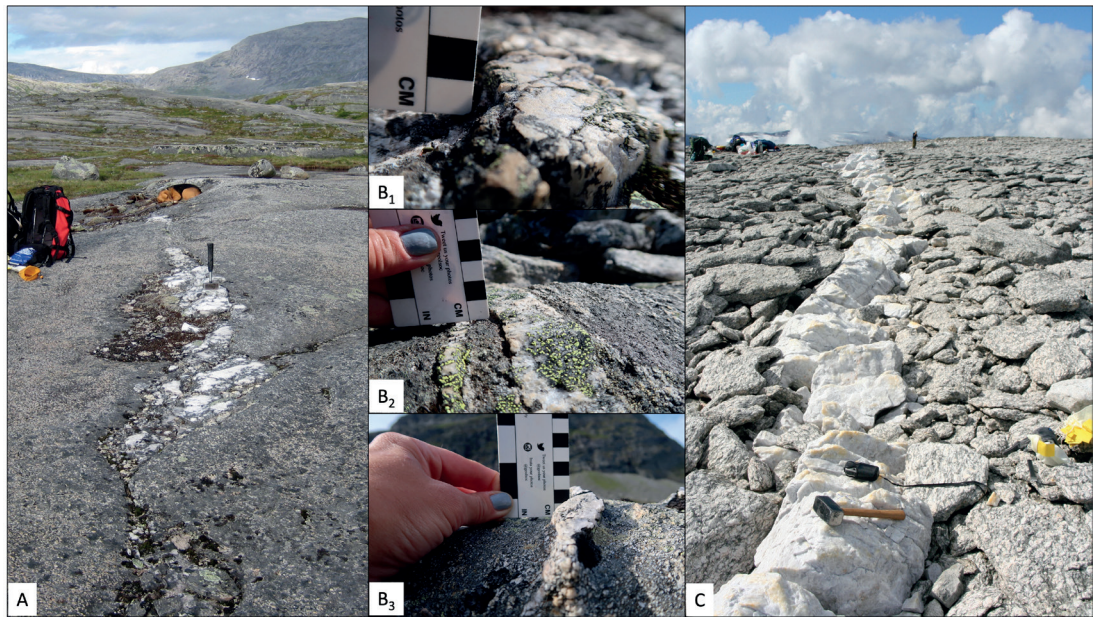


Fig. 2 | Kvarts opptrer i en rekke bergarter og er det nest vanligste mineralet i jordskorpen. Vi som jobber med kosmogene nuklider er spesielt glade i kvartsganger. A. Kvartsgang i Tysfjordgranitt nær Gussajåvrr. Gangen stikker så vidt opp over granitten. Flaten er omkring 10 000 år gammel. B. Typiske overflaterelieff i Alnesdalen der kvartsganger stikker 0,5-2 cm opp eller ut av gneisen, et resultat av 12 000 år med "vær og vind". C. Kvartsgang i øyegneis nær Meleinsnibba, Stryn. Både kvartsgangen og berggrunnen den går i er kraftig oppsprukket, blokkhav med spredte transporterte blokker (flyttblokker). Tilsynelatende minimumsalder for kvartsflatene er 32 000 år. Foto: Henriette Linge

til, er karbon-14 (C-14 eller ^{14}C). ^{14}C er en kosmogen radionuklide med en halveringstid på 5730 år. Den dannes i atmosfæren ved at kjernen til nitrogen-14 (^{14}N) absorberer et nøytron og sender ut et proton. ^{14}C tas opp i den globale karbonsyklusen og gjør det mulig for oss å aldersbestemme organisk materiale ved ^{14}C - eller *radiokarbondatering*. Alderen til organisk materiale bestemmes ut fra den mengde ^{14}C som er igjen. En høy konsentrasjon av ^{14}C betyr at materialet er ungt, mens en lav konsentrasjon betyr at det er gammelt. Metoden ble utviklet i 1940-årene og brukes rutinemessig innenfor en rekke fagområder, som for eksempel arkeologi og kvartærgeologi. På jordoverflaten kan ^{14}C produseres fra oksygen-16 (^{16}O) i mineralet kvarts (figur 2). Det er en ganske ny teknikk å bruke ^{14}C i kvarts til aldersbestemmelse av landformer. Få laboratorier tilbyr dette kommersielt, fordi det er teknisk (tid-)krevende å ekstrahere C ut av kvarts. Den opplagrede mengden *in situ* ^{14}C gir et mål på tid – kortvarig eksponering for kosmisk stråling gir en lav konsentrasjon, mens langvarig eksponering gir høy konsentrasjon. På grunn av den korte halveringstiden tar det omkring 20 000 år før det blir likevekt mellom dannelse og nedbrytning.

Et annet eksempel på en kosmogen nuklide er beryllium-10 (Be-10 eller ^{10}Be). Beryllium er et sjeldent grunnstoff med tolv isotoper. Kun ^9Be er stabil, og det er bare denne og de radioaktive isotopene ^7Be og ^{10}Be som måles rutinemessig. ^{10}Be er en langlivet kosmogen radionuklide med en halver-

ingstid på 1,38 millioner år. ^{10}Be produseres for eksempel fra ^{16}O i atmosfæren. Atmosfærisk produsert ^{10}Be har vært spesielt viktig for synkronisering av paleoklimaarkiv fra både iskapper og dyhavssedimenter. ^{10}Be produseres også fra ^{16}O i mineraler på jordens overflate. ^{10}Be i kvarts ble først brukt til aldersbestemmelse av landformer sent på 1980-tallet og er i dag en hyppig anvendt metode. Kvarts er et veldig vanlig mineral, og den relativt lange halveringstiden til ^{10}Be gjør at den kan brukes til å datere flater som er fra noen hundre år til flere millioner år gamle.

Hvilken nytte har man av kosmogene nuklider i geofag?

Relative dateringsmetoder gir oss informasjon om relativ alder på landformer, avsetninger og geologiske hendelser. En steinsprangblokk er for eksempel yngre enn den hevede strandvullen den ligger på. Numeriske dateringsmetoder gir oss tallestimat på kronologisk alder. Spesifikke mineraler i en steinprøve kan brukes til å estimere når bergarten ble dannet, når den eventuelt ble deformert, og når den ble avkjølt til nær overflatetemperatur. Unikt for kosmogene nuklider er at de kan brukes til å estimere hvor lenge en flate har vært blottet for vær og vind (*eksponeringsdatering*), hvor lenge en flate har vært begravd eller skjermet (*overdekningsdatering*), eller med hvilken hastighet en flate brytes ned (*erosjonsrater og nedslitingshistorie*).

Lal og Peters presenterte de teoretiske prinsippene for geologisk bruk av kosmogene nuklider allerede i 1967. Det var imidlertid først i 1978 at det kom en analyseteknikk som kunne måle små mengder av en nuklide, akselerator-massespektrometri (AMS). Takket være fremskritt innen kjernefysikk ble derfor resultater fra studier som brukte in situ kosmogene nuklider publisert i tidsskriftene *Nature* og *Science* i 1986. I dag ser man at disse arbeidene markerte starten på en "gyllen æra" for geomorfologi, altså vitenskapen om landformer og landformdannende prosesser. Etter flere tiår med feltundersøkelser, teknologiske forbedringer og tverrfaglig samarbeid kan nå konsentrasjonen av én eller flere kosmogene nuklider brukes som pålitelige mål på tid. Vi kan preparere mindre prøvemateriale enn tidligere, lage renere sluttprodukter, og dermed oppnå mer presise AMS-resultater. I tillegg er halveringstiden til de radioaktive kosmogene nuklidene bestemt enda mer presist. Produksjonsraten til en gitt kosmogen nuklide, det vil si antall atomer som dannes per gram mineral per år, kan beregnes tilstrekkelig presist for enhver lokalitet på jorden ut fra et kalibreringsdatasett og ligninger som beskriver fordeling av fluks med høyde over havet og breddegrad. Kalibreringsdatasettet er utviklet ved analyse

Fig. 3 | Ruggesteinen Ruggå er en blokk av øyegneis som ligger på fast fjell på 545 moh. på nordenden av bygdeheia mellom Fjørå og Valldal (Fjord kommune, Møre og Romsdal). Blokken er en flyttblokk som innlandsisen har lagt igjen. ^{10}Be i materiale fra blokkens toppflate indikerer at Ruggå har ligget der i $13\,600 \pm 560$ år. Foto: Børre Grønningseter



av steinprøver (mineraler, bergarter) fra nøkkellokaliteter der flatenes alder har blitt datert med andre, uavhengige metoder.

I dag er metoder som bruker kosmogene nuklider, hyppig brukt innen geomorfologi, paleoklimatologi og geofarestudier. Vi kan for eksempel datere skred, skredår, forkastningsplan og flomavsetninger. Fremdeles er nok de vanligste prøvetakingsobjekter istransporterte blokker (figur 3) og iseroderte berggrunnsflater. Datering av slike former har for eksempel bekreftet antakelser om at mange botner sist hadde botnbreer for 12 000 år siden, i kuldeperioden yngre dryas-stadialen. Andre steder finner vi imidlertid at morenerygger som har vært antatt å være av yngre dryasalder, faktisk er litt eldre. Vi har også fått konkret informasjon om hvor mye eller hvor lite isbreer og isdekker har påvirket landskapet i noen områder. I noen fjellområder som beviselig har vært isdekket gjentatte ganger i kvartærtiden (siste 2,6 millioner år), finner vi at det kun har vært noen få meter med erosjon. Fra fjelltopper med blokkhav er det ikke uvanlig at kosmogene nuklider indikerer en overflatehistorie på minimum 250 000 år med isfrie forhold og minimum 150 000 år med isoverdekning. *Utfordringen ved å arbeide med landskapsutvikling er at selv om et landskap har landformer som stammer fra før istidene, så kan det også ha landformer og flater av mye yngre og ulike aldre.*

Eksponeringsdatering

Hvor lenge har en steinflate vært blottet i dagen og blitt utsatt for vær og vind? Fordi jordoverflaten eksponeres for kosmisk stråling, kan konsentrasjonen av en gitt kosmogen

nuklide gi oss svar på dette. Dette kaller vi eksponeringsdatering. Avhengig av varighet av eksponering vil det være målbare mengder av kosmogene nuklider i berggrunn ned til 2–3 meter under overflaten. Avhengig av bergartstype og forvittrings- og erosjonsrate kan vi datere landformer med flater som er fra noen hundre år gamle til flere titall millioner år gamle. Ingen annen metode kan gjøre dette.

Eksponeringsdatering er den enkleste og mest brukte anvendelsen av kosmogene nuklider. Ved å analysere en kjent mengde prøvemateriale kan vi beregne konsentrasjonen (atomer per gram mineral) og dele den på produksjonsraten (atomer per gram per år) og dermed estimere eksponeringsalderen til flaten som prøvematerialet kommer fra.

Forvitring bryter ned mineraler over tid. Erosjon fjerner løst materiale og sliter ned steinflater. På denne måten fjernes også overflatemateriale med kosmogene nuklider. Derfor er det erosjonsrate, fremfor nuklidenes halveringstid, som bestemmer den øvre rekkevidden til datering med kosmogene nuklider. Selv der vi har "gamle" landskap, vil flatene normalt ikke kunne gi veldig høye aldre. Steinflater forblir sjelden uendrede over hundretusener eller millioner av år. Unntaket vil være der man har spesielt motstandsdyktige bergarter eller ekstremt tørt klima. Flater i McMurdo Dry Valleys i Antarktis og i Atacama-ørkenen er funnet å ha vært nærmest upåvirket av erosjon i henholdsvis 10 og 25 millioner år.

Fig. 4 | Blokk i en nesten 7000 år gammel fjellskredavsetning i Bondhusdalen. Mari Ingeborg Hope Nesse kartla en fjellskredavsetning, Vassura, i Bondhusdalen (Kvinnherad kommune, Vestland) i sitt mastergradsprosjekt i geovitenskap. Ved å analysere prøvemateriale fra seks blokkflater for ^{10}Be , fant hun at skredhendelsen fant sted for $6\,820 \pm 660$ år siden. Foto: Henriette Linge



Fig. 5 | Opstadhornet (734 moh.) på Otøyra (Molde kommune, Møre og Romsdal) har et løst parti på omkring 700 x 700 meter. En 10–20 meter høy skrent, et glideplan, er blottet i bakkanten. Dersom bergmassen sklir ut i fjorden, kan flodbølger gjøre store skader langs Romsdalsfjorden. NVE har derfor overvåket fjellet siden 2003 og registrerer bevegelser på rundt 2 mm per år. Reginald Hermanns med flere har tidligere gjort ^{10}Be -datering av tre nivå (markert med røde punkter) langs glideplanet. Resultatene viser at Opstadhornet har vært ustabil siden fjellet ble isfritt for omkring 16-tusen år siden. Tall i røde bokser viser publiserte aldre, og disse kan tolkes dithen at utglidningen har bremsset opp mot vår tid. For å rekonstruere en mer detaljert utglidningshistorie har Laura Gatica, masterstudent på Institutt for geovitenskap, UiB, samlet inn nye prøver (hvite sirkler) til datering. Foto: Henriette Lingø

Norges landskap er preget av små- og storskala landformer dannet gjennom en eller flere istider. Andre landformer er dannet av prosesser som krever permafrost (uten isbreer), andre igjen reflekterer justering fra et istidsmiljø til et mellomistidsmiljø, som skråningskollaps eller tilpasningsgjel. Skredavsetninger og ustabile skråninger er vanlige komponenter i det norske landskapet. Det er veldig viktig å kunne aldersbestemme skredavsetninger (figur 4) og berggrunnsflater i skredsår og glideplan (figur 5). På denne måten kan vi utforske koblinger mellom landformer og klima, og forbedre vår kunnskap om og forståelse av geofarar.

Komplekse overflatehistorier

Hvor hurtig tæres steinflater ned av kjemiske og mekaniske prosesser på jordas overflate, og har nedtæringen vært jevn, variabel eller episodisk? Forholdet mellom to eller flere kosmogene nuklider i steinflater kan gi oss svar på slike spørsmål.

Hvor lenge en steinoverflate har oppholdt seg på eller nær jordens overflate, registreres gjennom konsentrasjonen av kosmogene nuklider i mineraler. En flate som tæres sakte ned, vil ha en høyere konsentrasjon enn en som slites ned hurtig. En flate som har en sammensatt historie med vekslende





perioder med eksponering og (is-)overdekning, vil ha høyere konsentrasjoner av kosmogene nuklider enn en flate som først ble blottet for eksempel etter flere meter med iserosjon eller gjennom en skredhendelse. Eksponeringsalder fra flater med sammensatte overflatehistorier omtales ofte som tilsynelatende aldre. Aldrene overestimerer typisk tidspunktet for når flaten ble isfri, men de er også for lave til å gi meningsfulle estimat på alderen til eldre landskap.

I sitt mastergradsprosjekt i geovitenskap studerte Judith Margrete Vestre blokkhavsdekkede fjelltopper i Møre og Romsdal, fra Gamlemsveten i vest til Breidtinden i øst. Rett øst for Gamlemsveten på Sunnmøre danner Tverrbotshornet og Tverrfjellet et lite fjellplatå (figur 6), omkring 740 meter over havet. Sørvest for Gamlemsveten ligger Hamnsundhelleren, hvor det er funnet beinlag fra isfrie perioder før siste istids maksimum. Overflaten på Tverrbotshornet har blottet bart fjell med overgang til oppsprukken berggrunn og blokkhavsdekke. Videre nordover, mot Tverrfjellet, går overflatekarakteren over til strukturmark med spredte flyttblokker; grovere materiale definerer sirkler, mens vegetasjon dekker finere materiale. Flyttblokkene gir ^{10}Be -aldre omkring 15 000–16 000 år (figur 6), og indikerer tidspunkt for når den siste innlandsisen smeltet bort i denne høyden. Berggrunnsflater gir ^{10}Be -aldre på 50 000–60 000 år (figur 6), noe som forteller oss at her har isen erodert mindre enn 2–3 m. Berggrunnen inneholder altså kosmogene nuklider produsert før siste istids maksimum. Tilstedeværelsen av blokkhav og strukturmark er nettopp bevis på beskjeden eller manglende iserosjon. Flater av kantede blokker og stein gir her tilsynelatende ^{10}Be -aldre mellom 15 000 og 140 000 år (figur 6). De yngste aldre stemmer med flyttblokkene, mens alt som er eldre, forteller oss at prøvetatte flater har hatt

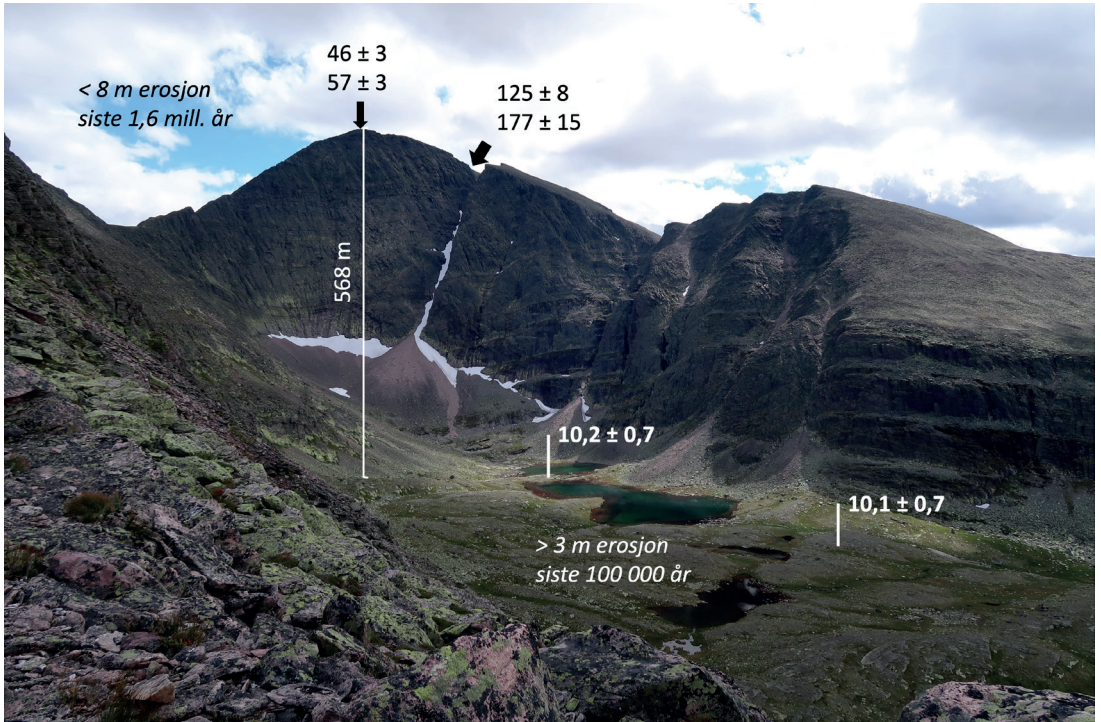
Fig. 6 | Eksponeringsdatering avslører et virvar av høye og lave aldre på et fjellplatå på Sunnmøre. Tverrfjellet (744 moh.) og Tverrbotshornet (749 moh.) sett fra veiern til Gamlemsveten (Ålesund kommune, Møre og Romsdal). Aldre er her oppgitt i tusen år. Aldre med fet skrift er fra toppflater av glasialt transportert blokker. Aldre i kursiv er fra flater av stedegent blokkhavs materiale. Aldre med understrekning er tilsynelatende aldre fra flater av eksponert berggrunn. Foto: Henriette Linge

Fig. 7 | Eksponeringsaldrer fra flyttblokker og berggrunnsflater kan fortelle veldig forskjellige historier. På Storsølnkletten (1826 moh.), Alvdal vestfjell, har berggrunnen av meta-sandstein blitt lite erodert under siste istid. Tallene i boksene er aldrer oppgitt i tusen år. Tilsynelatende ^{10}Be -aldrer er på omkring 60 000–70 000 år, mens ^{14}C -aldrer er på omkring 16 000–18 000 år. Toppflatene til glasialt transporterte granittblokker – ekte flyttblokker – gir derimot omkring 12 000 år. Foto: Henriette Linge

langvarig overflatenærhet og liten erosjon i løpet av siste istid. Ser man på forholdet mellom nuklidepar, som $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ eller $^{14}\text{C}/^{10}\text{Be}$, fra flater med sammensatte historier, avviker disse tydelig fra flater som kun har en enkelt eksponeringsepisode. En lokalitet som viser dette, er Storsølnkletten (1827 moh.) i Alvdal vestfjell (Innlandet) (figur 7). Her finner vi unge og gamle flater i skjønn forening. Fjellet består av meta-arkose, en metamorft påvirket feltspatrik meta-sandstein. Bergarten lar seg spalte opp i tynne og middels tykke lag, slik at et isdekke lett kan plukke med seg flak. Selve toppen har mange berggrunnsblotninger, men toppområdet har blokkhavsdekke mot nordøst. Spredte blokker og stein finnes overalt, selv i fjelltoppens bratte skråninger. Der hviler flyttblokker godt på benker og trinn i meta-arkosen. Mange av flyttblokkene består av granitt og gabbro som stammer fra et grunnfjellsvindu rett sør for Storsølnkletten. Isen har tatt dem med seg 800 meter opp! ^{10}Be -aldrer fra istransporterte blokker og stein indikerer at fjelltoppen har vært isfri i omkring 12 000 år (figur 7). Berggrunnsflater gir tilsynelatende ^{10}Be -aldrer omkring 60 000 år. $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ -verdier indikerer imidlertid at disse flatene har vært overdekket, og ^{14}C -aldrer fra de samme flatene gir 16 000–18 000 år (figur 7). $^{14}\text{C}/^{10}\text{Be}$ -verdiene indikerer også overdekning. Resultatene kan tolkes til at toppen ble isfri før for 18 000 år siden, men at den ble begravd av innlandsisen på nytt. Storsølnkletten ble isfri for godt først for omkring 12 000 år siden.

Norge har mange små og store landformer som antas å ha blitt dannet gjennom flere istider og/eller mellomistider. Sammensatte historier er svært vanskelige å bekrefte uten





å analysere kosmogene nuklider. Ettersom vi kun kan måle konsentrasjoner, som er summen av flatenes historie, må komplekse historier modelleres ved numerisk simulering av blant annet målte konsentrasjoner og forholdstall. Et eksempel på slik modellering har vi fra Rendalssølen (figur 8) i Rendalen kommune (Innlandet). De tre toppene i Rendalssøl-massivet består i hovedsak av sandstein med hyppige innslag av konglomerat. Toppen av både Midtre og Nordre Sølen har flater av bart og oppsprukket fjell, skråningene er dekket av blokkhav. Det er funnet istransporterte stein opp til 1650 moh., i hovedsak fra kildeområder i nord. ^{10}Be -aldre fra berggrunnsflater på de to fjelltoppene gir aldre mellom 50 000 og 130 000 år. Det er i seg selv ikke oppsiktsvekkende, siden regionen er karakterisert av liten grad av glacial erosjon i siste istid. Landformer og løsmasser som har overlevd minst én istid, er vanlige her, fordi isdekkene i stor grad var kaldbaserter, altså fastfrosset til underlaget. Det som er spennende, er at vi kan bruke $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ -verdiene til å undersøke hvor lenge flatene har vært overdekket. I sin mastergradsoppgave gjorde Audun Hitland numerisk modellering av disse flatenes historier. Numerisk modellering eller simulering går ut på å finne de kombinasjoner av erosjon og overdekning (skjerming) av isdekker, og erosjon i isfrie perioder, som best forklarer forholdstallene. Hitland fant at flatenes reelle aldre er mellom 1,2 og 1,6 millioner år, og at Rendalssølen

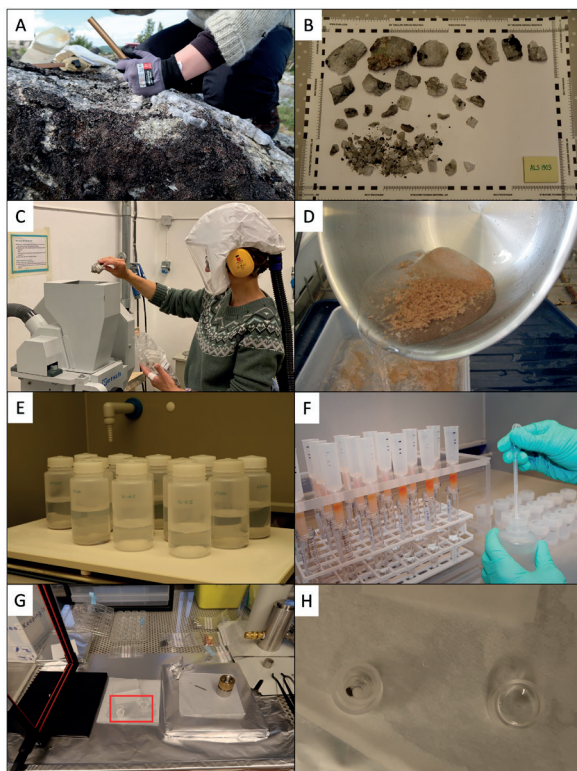
Fig. 8 | Midtre Sølen (1755 moh.) sett fra nordvest. Tallene er aldre oppgitt i tusen år. Selve toppen gir tilsynelatende ^{10}Be -aldre på omkring 50 000 år, mens berggrunnsflater hundre meter lenger ned i skråningen gir mer enn dobbelt så høye aldre. ^{10}Be -aldre fra berggrunnsflater i dalbunnen, nesten 600 meter under toppen, viser at dalen har vært isfri i omkring 10 000 år. Tross gjentatte istider de siste 2,6 millioner år har fjelltoppene endret seg lite i siste halvdel av kvartærtiden. Erosjonsrater modellert fra flatenes innhold av kosmogene nuklider indikerer at mindre enn 8 m berggrunn er fjernet i toppområdet. Samtidig har botner og sekedaler blitt utviklet langs Rendalssølen vestside. Foto: Henriette Linge

topper sannsynligvis har blitt erodert mindre enn åtte meter de siste 1,6 millioner år (figur 8). Dette står i sterk kontrast til den storskala erosjonen som formet fjorder og daler i det samme tidsrommet. Det er altså fremdeles mer å finne ut om hvordan landet ble til.

3. UiBs prepareringsfasilitet for kosmogene nuklider

UiB har Norges eneste prepareringslaboratorium for kosmogene nuklider ("Kosmolab"). Det ble opprettet på Institutt for geovitenskap da da Bjerknessenteret for klimaforskning hadde status som senter for fremragende forskning. Laboratoriet bruker flere av fellesfasilitetene på Institutt for geovitenskap, som kjefteknuser, skivemølle, magnetseparator og ICP-AES.³ Selve prepareringslaboratoriet består av tre rom; to brukes til mineralseparasjon og ett utelukkende til våtkjemi med ren kvarts. AMS-analysene utføres utenlands. Laboratoriet er utstyrt for å lage AMS-preparater for analyse av Be og Al fra steinprøver. Vi gjør mineralseparasjon for å isolere og anrike kvartsfraksjonen, renhetstest av kvarts, ekstrahering av Be og Al fra ren kvarts, og lager AMS-preparater (figur 9). Det hele innebærer omkring ti uker med laboratoriearbeid. For å minimere de analytiske usikkerhetene er det viktig at laboratoriet og kjemikaliene er så rene

Fig. 9 | Fra steinflate til AMS-prøve: A. Innsamling av prøvemateriale, her løses kvartsflak i granitt ved bruk av hammer og meisel. B. Prøvedokumentasjon. C. Knusing og pulverisering. D. Flere trinn med mineralseparasjon, her eksemplifisert ved flotasjon som skiller feltspat og kvarts fra hverandre. E. Ren kvarts til oppløsning i teflon-flasker. F. Kationkolonnekjemi der Be og Al separeres og elueres. G. og H. Sluttproduktet BeO i en kvartsdigel (ca. 1 cm diameter) før det blandes med niob og presses i AMS-katoder. Foto C: Lars Evje. F: Irene Heggstad. Øvrige foto: Henriette Linge.



som mulig. Dette overvåker vi ved preparering av blank-prøver, altså prøver som er uten geologisk materiale, men som tilsettes alle kjemikalier. I tillegg preparer vi standardprøver av kvarts, og kan på den måten se at laboratoriet produserer AMS-preparater av samme høye vitenskapelige standard som andre prepareringslaboratorier.

Alle geologiske prøver, blank-prøver og kvartsstandarder tilsettes en spike eller bærer. For beryllium er dette en standardløsning med kjente konsentrasjoner av ^9Be og ^{10}Be . Be-standarder til vårt formål kan ikke kjøpes, vi har derfor laget vår egen av fenakitt fra en dyp gruve i Brasil. Gjennomsnittlig $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ -verdi for våre blankprøver er mindre enn 1×10^{-15} så i Be-standarder vår er det altså omtrent ett ^{10}Be -atom per 1 000 000 000 000 ^9Be -atomer. AMS-analyse fungerer på den måten at man analyserer forholdet mellom ulike isotoper av et grunnstoff. Siden vi kjenner mengden tilsatt ^9Be , kan vi derfor regne ut mengden ^{10}Be i en geologisk prøve og dermed regne ut konsentrasjonen. Konsentrasjonen, sammen med feltdata for lokalisering, høyde over havet, prøvetykkelse og topografisk skjerming, brukes til å beregne en modellalder med usikkerhet for flaten som prøven kom fra.

NOTER

1. En nuklide er et atom med et bestemt antall protoner og nøytroner i kjernen, nuklider av samme grunnstoff er isotoper. Isotoper er altså varianter av et grunnstoff, de har de samme kjemiske egenskapene, men ulike atomvekter. En nuklide kalles kosmogen når den er dannet som et produkt av kosmisk stråling, mens den er radiogen dersom den er et produkt av radioaktiv spalting. En radionuklide har en ustabil kjerne som før eller senere spaltes og sender ut radioaktiv stråling. En stabil nuklide vil forbli uendret med tid så lenge den unngår påvirkning av kosmisk eller radioaktiv stråling.
2. I denne teksten vil vi for enkelthets skyld omtale in situ kosmogene nuklider uten det latinske attributtet.
3. Induktivt koblet plasma-atomemissjonsspektrometer, et instrument som brukes til bestemmelse av grunnstoffer.

KILDER

- Balco, G. (2011). Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990-2010. *Quaternary Science Reviews* 30, 3-27.
- Bierman, P.R., Portenga, E.W. (2018). Beryllium Isotopes. I: White, W. (red.) *Encyclopedia of Geochemistry*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_81-1
- Darvill, C.M. (2013). Kapittel 4.2.10. Cosmogenic nuclide analysis. I: Cook, S.J., Clarke, L.E. & Nield, J.M. (red.) *Geomorphological Techniques* (Online Edition). British Society for Geomorphology, London. ISSN: 2047-0371.
- Dunai, T.J. *Cosmogenic nuclides. Principles, concepts and applications in the Earth surface sciences*. Cambridge University Press 2010, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804519>
- Gosse, J.C., Phillips, F.M. (2001). Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews* 20, 1475-1560.
- Hermanns, R.L., Oppikofer, T., Dahle, H., Eiken, T., Ivy-Ochs, S., Blikra, L.H. (2013). Understanding long-term slope deformation for stability assessment of rock slopes: the case of the Opstadhornet rockslide, Norway. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment - Book Series* 6, 255-264.
- Hitland, A. (2019). Estimering av landskapshistorie ved bruk av in situ kosmogene nuklidepar. Mastergradsoppgave i geovitenskap, Institutt for geovitenskap, Universitetet i Bergen. <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/1956/20415>
- Lal, D., Peters, B. (1967). Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth. I: Sitte, K. (red.) *Kosmische Strahlung II / Cosmic Rays II. Handbuch der Physik / Encyclopedia of Physics*, vol 9 / 46 / 2. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46079-1_7
- Nesse, M.I.H. (2022). Skredkartlegging og 10Be-eksponeringsdatering av fjelskred i Bondhusdalen, Kvinnherad kommune. Mastergradsoppgave i geovitenskap, Institutt for geovitenskap, Universitetet i Bergen. <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/11250/2998598>
- Schaefer, J.M., Codilean, A.T., Willenbring, J.K., Lu, Z.-T., Keisling, B., Fülöp, R.-H., Val, P. (2022). Cosmogenic nuclide techniques. *Nature Reviews Methods Primers* 2, 1-22.
- Vestre, J.M. (2022). Blokkhav på fjelltopper på ytre Sunnmøre og indre Romsdalsfjorden. Mastergradsoppgave i geovitenskap, Institutt for geovitenskap, Universitetet i Bergen. <https://hdl.handle.net/11250/2990014>
- Henriette Linge, professor (henriette.linge@uib.no) og Lars Evje (lars.evje@uib.no)