

## The ages of the Scandinavian caves

The Ages of the Scandinavian caves

Over 2550 dissolutional caves are known in Norway and Sweden. These caves have formed mainly in stripe karst Caledonide marble outcrops that have negligible primary porosity. Speleogenesis was commonly initiated by tectonic inception, in fractures caused by isostatic rebound during one or more Quaternary deglaciations. This was followed by dissolution in fast-flowing aggressive meltwater during deglacial speleogenesis in phreatic conditions and sporadically by later interglacial speleogenesis, creating tiers of relict phreatic passages above an active streamway in the more complex caves. About 50 dissolutional caves are also formed in other limestones. Well over 300 coastal caves are recorded along the coastlines, with about 50 tunnel caves above the Baltic coast, and over 800 fracture and over 1200 talus caves occur in both countries. This article reaches the firm conclusion that the survival of any non-hypogenic karst cave passages formed before the Mid-Pleistocene Revolution, about one million years ago, would be exceptional. The larger Norwegian coastal caves were mainly formed and enlarged by marine abrasion and ice wedging during the onsets of one or more of the last few glaciations and by later roof collapses. Some probably exist beneath the Norwegian Sea. The same processes enlarged the entrances of several well-known karst caves. The fracture and talus caves were formed by seismic events during Weichselian deglaciation. Because of the removal of caves and cave passages by the glacial erosion of marbles and other rocks, many surviving caves might be related to earlier palaeo 'cave passages in the sky'.

## The ages of the Scandinavian caves

Alderen på de skandinaviske grottene

### Innledning

Det finnes mer enn 2500 kjente grotter i den kaledonske marmoren fra kambrosilurtiden i Norge og Sverige. Figur 1 viser strukturgeologien forenklet for en passende del av Skandinavia og markerer den østre grensen for de kaledonske skyvedek-kene over det eldre grunnfjellet. Flere enn 1100 av disse grottene ligger i det nordlige Skandinavia, mer enn 1200 i det midtre og mer enn 200 i det sørlige. I Norge finnes det mer enn 600 kjente ikkekarst-grotter. Disse inkluderer mange brenningshuler, noen av disse er store. Sverige har mer enn 800 tektoniske sprekkegrotter, mer enn 1200 tektoniske blokkgrotter og mer enn 300 kystgrotter. Det er et interessant spørsmål om noen grotteganger, uansett grottetype og litologi, kunne ha overlevd fram til nå hvis de ble dannet før de ca. 50 kvartære istidene i løpet av de siste 2,58 millioner år. Denne artikkelen ser på maksimale alderer for forskjellige grottetyper.

### Utviklingen av det skandinaviske landskapet

Skandinavia er en del av den kaledonske fjellkjeden med forbindelse til Appalachene som en gang strakk seg fra Spitsbergen til Mexicogulven. Denne eldgamle fjellkjeden ble dannet av den kaledonske fjellkjedefoldningen. Et meget komplekst system med fjellkjededannelse i forbindelse med platetektonikken som åpnet og lukket lapetushavet, fra senprekambrium til midtre paleozoikum. Lukkingen av lapetushavet skapte fire store alloktoner (dekkeserier) ved at metamorfe og vulkanske bergarter ble skjovet i sørøstlig retning over det eldre baltiske dekket. Mer enn 850 marmorstriper finnes bare i det midtre Skandinavia i det brattfolierte amfibolittholdige øverste allokton (hovedsaklig i Norge) og i Kølidedekene i øvre allokton i begge land. Etter lukkingen av lapetushavet var det både marine transgresjoner og landhevninger i Skandinavia, noen av dem i forbindelse med åpningen av Atlanterhavet. Fra før kvartær opplevde Skandinavia gjentatte glasier som skurte landskapet og dannet dype daler og fjorder, selv om topografien fortsatt i hovedsak dirigeres av den kaledonske geologien. Hele Skandinavia var dekket av is i løpet av hver større glasier, vist ved at det er flyttblokker opp til 1700 moh. i midtre Skandinavia, hvor isen stiger til lavere høyder enn høydedragene i i Nord- og Sør-Norge. Denne sadellignende formen utgjorde et lavere hinder for øst-vest bevegelsen i sen pleistocen og dannet en hovedlinje for isens bevegelse, i hvert fall under den siste istiden. Lengden og dybden på fjordene viser de eroderende kreftene til brestrømmene og de store volumene med is som beveget seg vestover i løpet av mange istider.

Et interessant tema er overlevelsen av den paleiske flaten eller gjenværende landskap, hvor topografien ikke er nevneverdig endret av isens erosjon siden tertiær. Dette kunne skje under kaldbaserte isdekker på høye platåer. Dette er viktig fordi hvis noen tidlig dannet grottegang fortsatt eksisterer må den ha vært utviklet lenger fra den nåværende overflaten enn dybden på erosjonen i kvartær. I Sverige, som fortsatt har en paleisk avrenning mot sørøst, ser det ut til å forme hele overflaten, bortsett fra langs bunnen av store daler. Imidlertid er det paleiske landskapet i Norge for det meste erstattet av det bratte relieffet av den skandinaviske fjellkjeden. Den vestlige utstrekningen av den paleiske flaten har vært tolket som de høyeste delene, i hovedsak øst for det øverste allokton nær svenskegrensen (Figur 1). I midtre Skandinavia er det bare seks grotter like under disse mulige paleiske flatene i Norge. På den svenske siden er de fleste karbonatbergartene i dagen og 104 (66 %) av karstgrottene lokalisert på den mulige paleiske flaten. Imidlertid reises det nå tvil om konseptet med den paleiske flaten. Volumet av sedimenter offshore, det generelle fravær av

kraftig forvitrede fjelltopper, bergspir og autoktone (stedegne) blokkfelter og tilstedeværelsen av isskurt berggrunn (eks. Figur 3) i og ved mange norske grotteområder. Dette tyder på at mye av Norge var dekket av tykke, hurtige, tempererte isdekker og at erosjonen til og med i Sverige muligens var mer enn 20-40 m i løpet av de siste en million årene. Derfor legger denne studien til grunn at det ikke finnes noen effektiv paleisk flate for noen kaledonske marmorforekomster, slik at grottealdre kan betraktes ut fra andre prinsipper.

### Speleogenesen til marmorrottene

Karstgrottene kan forekomme på alle høydenivåer, fra dalbunnene til rygger over dalskuldrene, bortsett fra på fjelltopper. De er i all hovedsak dannet i stripekarst, kaledonske marmorforekomster med liten eller ingen opprinnelig porøsitet. Metamorfose av den originale sedimentære bergarten umuliggjør overlevelse av eventuelle karstrom fra før slutten av den kaledonske fjellkjededannelsen. Disse grottene ble vanligvis dannet ved tre forskjellige prosesser: tektonisk begynnelse, i sprekker som oppsto som følge av landhevninger i en eller flere kvartære avsmeltingsfaser, speleogenese under avsmelting, ved oppløsning i hurtig, aggressivt smeltevann da isen smeltet og dannet isdemte sjøer (IDLs) som oversvømte sprekke og sporadisk ved senere interglasial speleogenese i den vadose sonen og kanskje under freatiske forhold på de laveste nivåene i grotten.

Disse prosessene skapte grotter av tre hydrologiske klasser: Sammensatte grotter, med lagvise nivåer av forlatte freatiske passasjer over en aktiv bekkegang i de lange og komplekse grottene, forlatte freatiske grotter, der det ikke fantes noe etterfølgende interglasialt nedslagsfelt og grunne aktive hovedsaklig vadose grotter under interglasialer. Gangene i de eldre sam-mensatte grottene ble vanligvis utviklet fra toppen og nedover og fra midten og utover, med lavere interglasiale trykkrør som vanligvis ble dannet etter hver istid. De var også involvert i et kappløp med utvikling langs dypere sprekker under hver avsmelting og mellomistid før de ble fjernet av etterfølgende istider og naturlig forvitring i mellomistidene, noe som skjer fra toppen og nedover og fra ytterst og innover. Grotteganger kunne ha blitt store i løpet av lange tidsrom før kvartær hvis de hadde passende hydrauliske forhold, slik at grotter kan ha blitt dannet tidligere i høyere nivåer av eksisterende marmorforekomster. Imidlertid ville slike grotter ha blitt erodert bort da landoverflaten ble senket med flere kilometer etter paleozoikum og særlig av istidene i kvartær.

I midt- og sørskandinavia er den vinkelrette avstanden målt fra overflaten til en grottegangs senter alltid mindre enn en åttendedel av det lokale relieffet (Figur 4). Dette gir en sannsynlig grense for åpningen av tektoniske startsprekker som følge av landhevning og impliserer at det var få lokale dype "åpne" sprekker før kvartær. En grotte i det midtre Skandinavia har en vinkelrett avstand på 93 m, åtte har ca. 50 m og resten ligger enda nærmere overflaten. Ut fra en typisk erosjonsrate på 40 m per istid (Tabell 1) vil da sannsynligvis alle eksisterende grotteganger ble erodert bort i løpet av bare noen få flere kvartære istider. Ut fra deres begrensede dybde, morfologien og nedslagsfeltene er alle de hovedsaklig vadose grottene dannet i holo-cen. Den overveldende majoriteten av de andre grottene ble sannsynligvis dannet under og etter avsmeltingen i weichsel, like før holocen. Noen eksisterende ganger i ca. 25 grotter eksisterte trolig i det tidligere eem interglasial mens de eldste overlevende ganger som er utviklet i flere sykluser trolig ble utviklet under avsmeltingen i elster for ca. 427.000 år siden. Høyere ganger i noen andre grotter ble sannsynligvis påbegynt under den tidligste avsmeltingen i saale for ca. 337.000 år siden. Det er bare i det nordlige Skandinavia det finnes mange lengre, dypere, større, mer komplekse og derfor sannsynligvis eldre grotter dannet i flere sykluser. Mange av disse er mye dypere enn en åttendedel av relieffet, med vinkelrette avstander opp til 400 m, noe som antyder at de tok i bruk dypere og eldre startsprekker som oppsto under plateforskyvningen forbundet med utvidelsen av Atlanterhavet. En av de eldste grottene i Skandinavia er Råggejavreraige, som også så vidt passer inn i en-åttendels regelen (Tabell 2) og har ca. ti utviklingsnivåer. Mange av disse er fortsatt utforsket, men deler av de øvre gangene kan ha overlevd i en million år, mens den nærliggende Tysfjorden ble dypere og videre.

Fire faktorer må hensyntas under diskusjon av alder på grottedannelsen. For det første, hvis dype grotteganger skal utvides ved oppløsning må det finnes aktive vannstrømmer i marmorforekomsten. Disse vil avhenge av isens utvikling av dype daler eller fjorder. For det andre, ved en erosjonsrate på 40 m per istid vil det laveste (aktive) nivået i Skandinavias lengste grotte Tjoarvekrajgge bli fjernet av ti nye istider. Det gjør det usannsynlig at dens eldre, høyere nivåer er eldre enn en million år. Eldre høytliggende ganger kan fortsatt eksistere i nordlige grotter på grunn av redusert iserosjon i store høyder utenfor det sentrale sadelformede området som fokuserte isstrømmen vestover gjennom det midtre Skandinavia. Dette kan ha tillatt slike ganger i "fler-syklus" grotter å overleve lenger. For det tredje, studier av vertikale kart av disse grottene indikerer langt færre enn ti nivåer med grotteutvikling, noe som tyder på lavere alder. Faktisk ser det ut til at Tjoarvekrajgge har bare fire. En fjerde faktor er størrelsen på de freatiske gangene. Den kjemiske og mekaniske erosjonen av raskt strømmende turbulent vann på veggene er ca. 1 mm per år. Det betyr at en freatisk gang kan vokse opp til 2 m i diameter på 1000 år, noe som var et typisk tidsrom for en oversvømmende isdemt sjø, eller opp til 20 m hvis en øvre gang overlevde ti avsmeltinger eller hvis en vannlås var kontinuerlig aktiv under en mellomistid på 10.000 år. Selv i de større grottene i nordre Nordland ville slike diameter være eksepsjonelle, noe som begrenser deres mulige alder.

### Tektoniske grotter og blokkgrotter

Alle de mer enn 2000 tektoniske grottene og blokkgrottene i Norge og Sverige ble også sannsynligvis dannet av tektonisk bevegelse under landhevning etter hvert som avsmeltingen og de tilhørende seismiske prosessene gikk

innover fra kystene. På grunn av deres manglende dybde og den svekkede berggrunnen etter sprekkedannelsene, er det sannsynlig at alle spor etter slike grotter ville bli fjernet av neste istid, selv under kaldbaserte isdekker, så alle de nåværende grottene er trolig dannet under avsmeltingen i weichsel for ca. 10000 år siden.

### Kystgrotter

Havet oversvømmte de nedpressede kystområdene under avsmeltingen og angrep den bratte fronten på det gjenværende isdekket og senere tungene på tidevannsbreer i fjordene. Uten vekten av isen startet landhevingen raskt. Isobaser fra yngre dryas (YD) viser størrelsen på landhevingen på hvert sted relativt til det lokale havnivået siden starten på den nåværende holocene mellomistiden. Disse viser at Stadlandet befinner seg på 0 m isobase hengselinjen og at den kaledonske skyvefronten i det midtre Skandinavia har steget 360 m relativt til YD-havnivået ved 360 m YD-isobasen. Maksimumshøyden havet nådde på det frigjorte fastlandet er den marine grensen under isavsmeltingen (MG, men her kalt DML) som avhenger av isobasen, gitt at isen på det tidspunkt var smeltet bort på det stedet. Det var derfor en konkurranse ved hver karstgrotte i vest, under DML, etter hvert som oversvømmelsen og speleogenesen på grunn av drenerende IDLs potensielt ble innhentet av havet da isfronten trakk seg tilbake østover. Den marine grensen under istiden (GML) er maksimumshøyden som havet nådde innover i landet i løpet av en istid. Geologiske funn tyder på at GML i weichsel skjedde ved starten fra 115–100.000 år siden da breene bygde seg raskt opp i fjellet før havet frøs til. Lenger tilbake i tid, hvis 40 m med berggrunn ble fjernet av hver av de siste istidene, var det sannsynligvis 30 m ekstra landheving ved starten på neste istid. Derfor, hvis noen kystgrotter ble dannet før weichsel så kan de nå være høyere over havet enn de som ble dannet senere.

Kystgrotter kan derved deles opp i tre klasser. 1: Under DML og dannet bare under avsmeltingen i weichsel, med fallende havnivå lokalt, opptil 5 m høye. 2: Over DML og dannet under starten av nedisingen og/eller en stadial i weichsel, eller en tidligere nedising, med økende havnivå. Disse kan være veldig høye, vide og lange. 3: Under DML som ble dannet tilsvarende klasse 2, men utvidet under avsmeltingen.

Siden taket på de fleste høye kystgrotteåpninger er godt over DML må de predatere avsmeltingen i weichsel og holocen. De originale delene av lange kystgrotter i posisjoner som er beskyttet fra iserosjon kan delvis overleve flere påfølgende isti-der. Ut fra de høye kystgrottenes høyde over havet og deres YD-isobase (Figur 8), kan det utledes at noen ble dannet tidlig i marin isotopstadium (MIS) 8 eller tidligere. Daterte grottesedimenter fra noen grotter viser at de ble avsatt der godt før siste glasiale maksimum. Dannelsen av gjennomgangshullet i Torghatten er diskutert i artikkelen. Det er et stort forebulge-område vest for hengselinjen som hevet seg da Skandinavia ble presset ned under hver istid, en prosess som ble reversert under avsmeltingene. Under begge stadiene ville det ha vært flere øyer omgitt av ufrosset sjøvann og de eksisterende kyst-nære øyene ville ha vært større med fjelltopper godt over det lokale havnivået. Derfor, små kystgrotter ville dannes på disse øyene under starten på istiden og høye og vide grotter ville dannes under avsmeltingen. Disse kan fortsatt eksistere som ukjente havgrotter under dagens havnivå selv om noen vil være dekket av finsedimenter.

### Hybridgrotter

Også noen freatiske karstgrotter ble influert av marin påvirkning. Dette vises vanligvis ved hybride klasse 1 kystkarstgrotter ved konisk åpningsutvidelse eller ved at det finnes ikke-lagdelt sand, hull boret av marine skjell, skjellavsetninger eller rur. Fraværet av utvidede åpninger eller sandavsetninger i de hovedsakelig vadose grottene i søndre Nordland tyder på at de primært ble dannet etter avsmeltingen. De med store koniske åpninger over lokal DML er hybride klasse 2 kystkarstgrotter, som Øyfjellgrotta og Okshola/Kristihola, begge med flere nivåer utviklet i flere sykluser. Deres freatiske øvre nivåer ble dannet under sen-kvartære avsmeltinger, med åpninger forstørret av marine prosesser i MIS 5d eller tidligere (Figur 8). Gulvet i den høye åpningen til Setergrotta er lavt nok til å ha vært like under havnivå da den tinte fram, noe som gjør den til en hybrid klasse 3 kystkarstgrotte. Svarthamargrotta (forstørret nedre inngang), Svarthamarhola og Solvikhulen (konisk åpning) tinte fram ca. 9500 14C år før nåtid. Tabell 3 viser at alle disse grottene ligger for høyt til at de kan ha vært nært hav-nivået under avsmeltingen i weichsel. Svarthamarhola har store åpninger 245 og 295 moh. og øker mye i størrelse innvendig. Dens ekstraordinære størrelse for en marmorgrotte, dens blokkgulv og den korte avstanden til den koniske Solvikhulen tyder sterkt på at den ble dannet, og utvilsomt forstørret, av forskjellige marine ikke-karst prosesser. Dette skjedde i en tid med stor isostatisk nedpressing til tross for at den ligger 50 km fra dagens kystlinje. Fra Figur 8 ser vi at den øvre, østre åpningen til Svarthamarhola ligger så høyt at den sannsynligvis ble dannet i MIS 10, eller til og med tidligere. Den kan være den eneste kjente eksisterende karst- eller ikke-karstgrotte som var delvis under havnivået så tidlig. Derfor, heller enn at den og Solvikhulen er kandidater til før-kvartær karstdannelse, ble de trolig dannet i hovedsak av marine prosesser, med liten påvirkning av oppløsning. Kvithola i nærheten ligger over DML, men dens uforstørrede åpning og begrensede gangstørrelse tyder på at den ikke eksisterte da de andre åpningene i nærheten ble utvidet av havet. Den er en normal karstgrotte som kanskje ble dannet i løpet av 750 år av en oppløsende flom av smeltevann fra en IDL under avsmeltingen i weichsel, før marin invasjon.

### Konklusjoner

Tabell 4 oppsummerer den geologiske og litologiske fordelingen av de skandinaviske grottetyperne og angir den

sannsynli-ge alderen av deres eldste ganger. De eldste ligger i de kaledonske marmorene i Nord-Norge. Noen få av disse kan ha over-levd ti istider med aldre opp til omtrent en million år. De store kystgrottene langs norskekysten over deres lokale marine grense må predatere avsmeltingen i weichsel. Noen ble trolig dannet av blokkfall fra taket, marin abrasjon og ispåvirkning under starten på i hvertfall de tre siste istidene, da lokale havnivå steg raskt. Blokkfall fra taket ved et stigende havnivå gir en enkel forklaring på de store åpningene på noen få norske karstgrotter. Det er faktisk vanskelig å finne en annen geomorf påvirkning som kunne hatt den samme effekten. Fordi sprekker, og grottene selv, nedsetter motstandsdyktigheten til berggrunnen eller blokker mot glasial erosjon er det en tendens at grunne grotter, uansett litologi, blir fjernet av den istiden som kommer etter deres dannelse. Derfor vil beliggenheten til mange eksisterende grotter indikere beliggenheten til paleiske "overjordiske grotter" som tidligere eksisterte over og/eller bortenfor dem og i noen tilfeller har de tidligere vært tilknyttet. Å finne ut av alderen og speleogenesen til grotter er et moderat komplekst puslespill i fire dimensjoner. Ved å studere flere skandinaviske kystgrotter, inkludert kanskje tusenvis av ikke registrerte små ikke-karst og undersjøiske grotter skulle det være mulig å få mer innsikt i tidligere avsmeltings- og landhevingsperioder. Kunnskapen kunne så brukes til en mer detaljert forståelse av kvartær speleogenese.