

# HULER - mere end blot huller i jorden

Søren Skibsted

I de senere år har speleologien - huleforskningen - kastet nyt lys over en mørk underverden, der altid har været omgivet af en aura af mystik, overtro og undren. Udover at afsløre nye aspekter i hulernes udviklingshistorie, bringer undersøgelserne ny viden om tidligere tiders klimaforhold, menneske-, dyre- og planteliv samt øget forståelse af geologien og de hydrogeologiske forhold i områder, hvor undergrunden præges af hulrum og sprækker. I det følgende ses nærmere på nogle af de huledannende processer og forskellige aflejringstyper, der optræder i dette specielle miljø.

## Hvordan opstår huler?

Før i tiden blev de fleste af Jordens hulrum anset for dannet ad tektonisk vej. I mange huler ses nemlig forkastninger med glideflader. Dette betyder ikke nødvendigvis, at hulerne blev åbnet i forbindelse med forkastningsbevægelserne. Forkastningerne har derimod udgjort en række svaghedszoner, der har været styrende for de processer, der førte til hulernes dannelse.

Huler kan eksempelvis dannes ved bølge-, flod-, glacial- og vinderosion, vulkanisme, jordskælv, skredprocesser, trykaflastning eller findes som hulrum i størknede lavastrømme. Termal aktivitet under gletschere kan endvidere skabe ishuler af anselige dimensioner.

Det er imidlertid kemisk opløsning af især karbonatbjergarter - de såkaldte karstprocesser - der er de mest aktive og effektive, når det gælder dannelsen af mere komplekse hulesystemer. Det skyldes bl.a., at de hårde, massive kalksten besidder en vis fysisk styrke samtidig med, at de er relativt letopløselige for rindende og nedsivende vand. Vandet fungerer som en ganske svag syre på grund af opløst kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) fra atmosfæren og /eller egentlige jordlag.

Karstprocesserne er mest effektive i kalksten med sprækkesystemer, der skærer hinanden nær overfladen, hvor  $\text{CO}_2$ -koncentrationen af det nedsivende vand er højest, eller i den zone, der ligger nær det lokale grundvandsspejl.

Der skal ikke her redegøres nærmere for kemien bag opløsningsprocesserne, men dog nævnes, at hovedkomponenterne udgøres af vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ), kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) og calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ , oftest i formen calcit) samt de dissoci-

rede ionbestanddele  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  og  $CO_3^{2-}$  i mange forskellige blandings- og koncentrationsforhold.

Det kemiske forløb af opløsningsprocesserne afhænger bl.a. af  $H^+$  koncentrationen, mængden af opløst  $CO_2$ , vandtemperaturen, partialtrykket af  $CO_2$  i den luft (inkl. luftbobler) vandet er i kontakt med, samt vandets og kalkstens indhold af 'fremmede' komponenter (f.eks.  $NaCl$ ,  $CaSO_4$ ,  $CaMg(CO_3)_2$  og forskellige metalioner).

Da de hydrogeologiske forhold i karstområder kan være yderst komplicerede, skelnes der mellem karsthuler (eller dele heraf) dannet i den vandmættede zone, i den undermættede zone eller i den intermediære zone.



*Figur 1. Hule nær Ban Khang Ho, Nan Provinsen, Nordthailand. Hulen er opstået ved kemisk opløsning efterfulgt af nedstyrtning af store blokke fra loftet. De største blokke er 10 m lange.*

Skønt porøsiteten og permeabiliteten i hårde, massive kalksten generelt er lav, vil ned- og gennemsivende overflade- og grundvand finde vej gennem bjergarterne via eksisterende svaghedszoner, som f.eks. laggrænser, forkastninger og i særdeleshed sprækker. Det fremtrængende vand opløser kalkstenen langs sådanne zoner, der herved udvides og langsomt forbindes i et netværk af passager. I dette stadium spiller mekanisk erosion en ubetydelig rol-

le på grund af vandets endnu ringe gennemstrømningshastighed og mangel på de nødvendige mængder 'slibemiddel'.

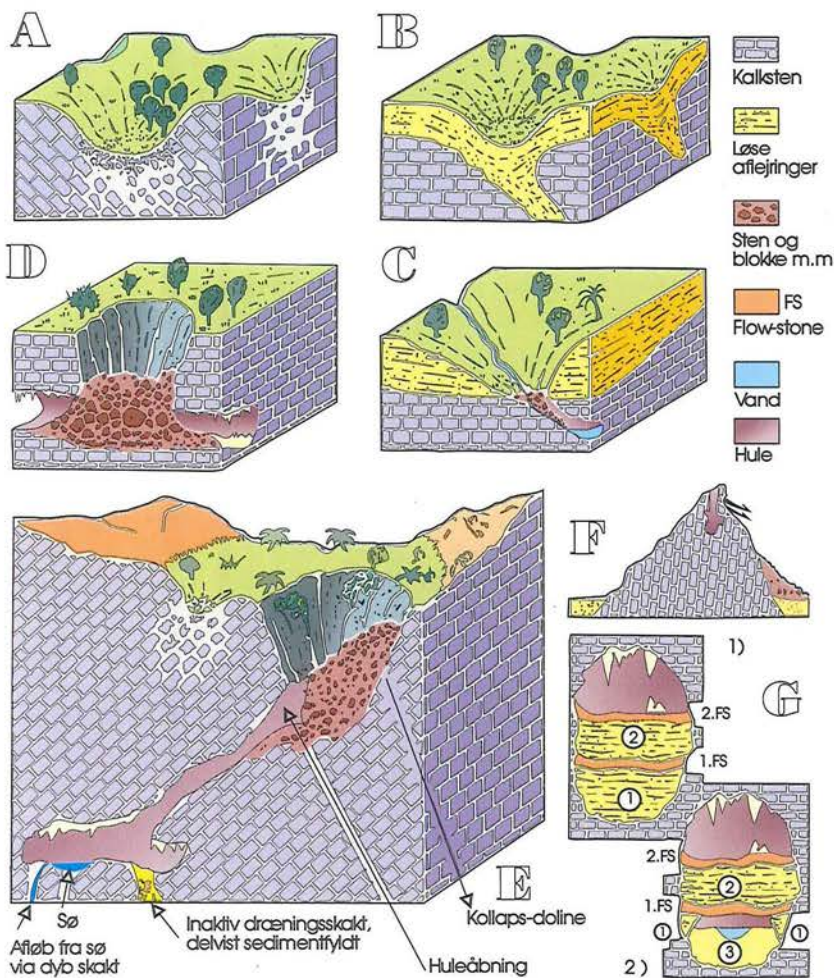
Undertiden er der dog i den vandmættede zone tilstrækkelig energi til at drive vandet igennem systemet med 'flodhastighed'. Herved vil én eller få passager vokse på bekostning af andre, og energitabet ved vandets friktion med de mange kanalvægge mindskes i takt med, at den samme vandmængde kan passere gennem systemet via færre kanaler med mindre friktion. Det medfører øget vandgennemstrømning og -tilførsel, hvorved disse 'trykørs-passager' ('pressure tubes') udvides ved en selvforstærkende effekt. De har stor betydning for udviklingen af nogle huler, hvor de udgør ryggraden i det hydrodynamiske system.

Når der er skabt en egentlig hule, vil den videre udvikling - udover opløsningsprocesser og geologisk virksomhed - også afhænge af, hvad vi kan kalde de indre processer. I kamrene kan der ske nedstyrtninger, der ændrer vandets bevægelsesmønster og skaber forbindelser mellem tidligere adskilte sektioner. I den undermættede zone vil etableringen af en egen huleatmosfære samt kondens og strømmende vand kunne modificere eksisterende former. Vandets konstruktive evner kommer således til udtryk i stadig stigende grad, og gennemstrømmende floder og vandløb kan erodere dybe kløfter og jættegryder og danne vandfald.

Ved dannelsen af karsthuler er der således et fint samspil mellem kemiske processer, geologi og hydrologiske forhold. De ydre fysiske rammer kan dog ændres drastisk i løbet af en hules udviklingsforløb. Tektoniske begivenheder og/eller klimatiske svingninger vil således have stor indflydelse på, hvilke processer, der foregår og dominerer i de forskellige faser af hulens udvikling.

Såfremt de rette geologiske forhold er til stede, og de huledannende processer fungerer optimalt, er der ingen grænser for, hvor omfattende hulesystemerne kan blive. Det størst kendte system er Flint Ridge - Mammoth Cave i Kentucky, USA, hvor man indtil nu har udforsket 350 km passager i fem etager. Den dybeste hule menes at være den 1494 m dybe Gouffre St. Bernard i de Franske Pyrenæer. I Sarawak findes verdens største enkeltkammer, Sarawak Chamber, med de imponerende dimensioner: 700 m langt, 400 m bredt og 280 m højt! Læserne kan nu selv regne ud, hvor mange fodboldbaner der ville kunne placeres i denne 'verdens største naturlige sportshal'.

Stejltstillede lag og forkastninger giver ophav til høje, smalle huler, mens mere fladtliggende lag favoriserer dannelsen af indviklede systemer samt store enkeltkamre (figur 1).



Figur 2. A) Opløsningsdoline, B) Indsynkningsdoline, C) 'Stream-sink' doline, D) Kollaps- eller indstyrtningsdoline, E) Kollapsdoline med tilhørende hulesystem ved Ban Khang Ho, F) Sprækkehule. G) Eksempel på kompleks stratigrafi i hule med 'falske gulve' af 'flow-stone' (brun) udviklet oven på løse sedimenter (gul). G1 viser yngre lag aflejret oven på ældre lag. I G2 er den ældste aflejring delvis fjernet, da et vandløb i hulen på et lavere niveau har aflejret de yngste sedimenter nederst i sekvensen.

En særlig type huler er de såkaldte sprækkehuler, der dannes ved gravitativ udglidning af stejlt stillede lag nær høje, lodrette klippevægge (figur 2 F). Sådanne huler kan blive mere end 100 m dybe.

Karstprocesser kan føre til et sandt overflødhedshorn af smukke og spændende landskabsformer, men her skal kun omtales nogle få typer, de såkaldte doliner (figur 2A-E og 3), der ofte står i direkte forbindelse med eksisterende huler og/eller huledannende processer.

Opløsningsdoliner (figur 2A) opstår som følge af opløsning af kalken nær overfladen på steder, hvor et netværk af sprækker skærer hinanden. Bemærk, at kalkstenen når helt op til overfladen i disse typer.

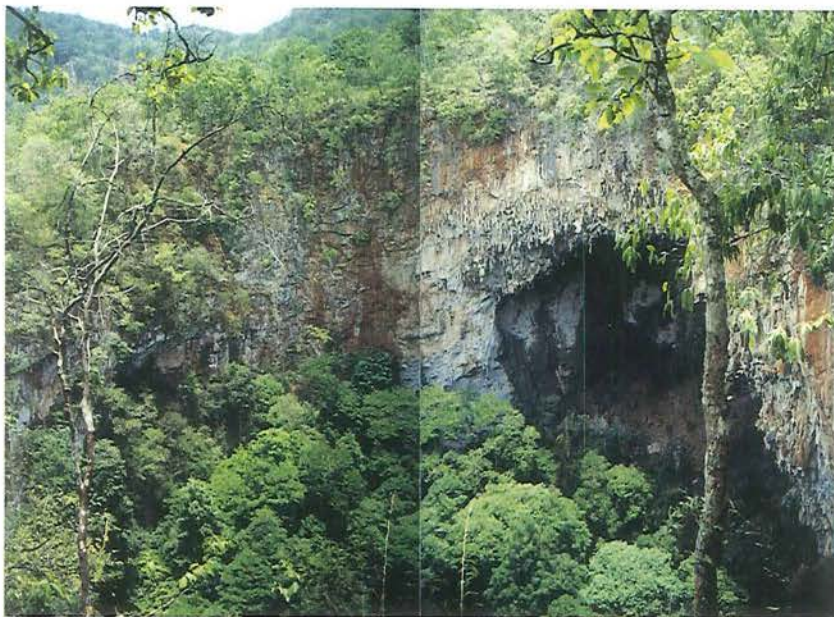
Indsynkningsdoliner (figur 2B) optræder, hvor kalkstenen overlejres af løse sediment, der synker ned, efterhånden som kalken opløses, eller hvor underjordiske hulrum i kalkstenen styrter sammen. I Danmark kender vi dette fænomen under betegnelsen jordfaldshuller, der findes på steder, hvor kalken/kridtet ligger umiddelbart under de kvartære aflejringer, f.eks. på Høje Møn og i Himmerland.

I 'stream-sink' doliner (figur 2C) forsvinder en flod eller et vandløb ned igennem de løse aflejringer og ned i den underliggende kalksten.

Kollaps - eller indstyrtningsdoliner (figur 2D-E og 3) skyldes sammenstyrning af en underliggende hule. Figur 2E viser et eksempel på en 80 m dyb kollapsdoline med tilhørende hulesystem, der når ned i en dybde af 190 m under overfladen. Bemærk, at den skrånende gang følger kalkstenslagets orientering.

Figur 4 viser et geologisk kort over området ved landsbyen Ban Khang Ho i Nan provinsen i Nordthailand, hvor sammenhængen mellem geologien og forskellige karstfænomener kan demonstreres. Læg mærke til, hvordan fordelingen af karstfelterne (sort) i udpræget grad falder sammen med udbredelsen af kalkstenen fra Mellem Perm (gult).

Kalkstenens homogene struktur har, sammen med et finmasket net af sprækker og varierende laghældninger, virket særlig gunstigt for opløsningsprocesserne, der bl.a. har skabt mange huler og forskellige typer doliner (figur 1 og 2A-E). Mod syd har en forkastning styret udviklingen af hulen Tham Nam Pua, samt givet ophav til flere store karstkilder.



*Figur 3. Nam Bor Phii (Åndebrønden), Mae Hong Son Provinsen, Nord-thailand, er en veludviklet kollapsdoline 140 m dyb og 120 m i diameter. Hulen er opstået ved indstyrning af loftet i en stor hule, hvis resterende del ses til højre i billedet. Bemærk stalaktiterne over hulens åbning.*

### **Aflejringer i huler**

Aflejringer i huler inddeles almindeligvis i 4 typer: 1) Kemiske aflejringer, 2) klastiske aflejringer, 3) Biogene aflejringer og 4) kulturlag.

Kemiske aflejringer ('speleothems'):

Disse aflejringer opdeles i flere grupper ud fra morfologi og dannelsesmåde og/eller vandets bevægelsesmønster, og omfatter bl.a egentlige drypsten, bassindannelser og 'flowstone'.

'Afgasning' af kuldioxid fra vandet til luften er en vigtig proces ved kemisk udfældning af calcit. Nedsivende vand, der er beriget med kuldioxid fra atmosfæren og senere mættet med  $\text{CaCO}_3$  under passagen gennem kalkstenen, kan på et tidspunkt nå frem til et hulekammer med et lavere 'kuldioxidtryk' end i atmosfæren og de øvre jordlag. Her vil vandet afgive  $\text{CO}_2$  til luften, når det drypper fra loft og vægge eller løber hen over ujævne flader. Vandet overmættes herved med  $\text{CaCO}_3$ , der kastes ud af opløsning og udfældes.

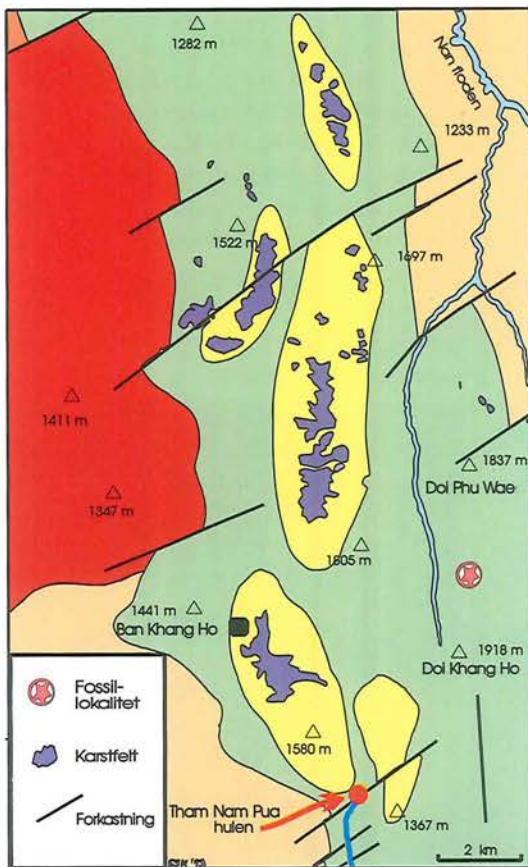
Figur 4. Forenklet geologisk kort over Ban Khang Ho området i Nan Provin-sen.

Gul: Kalksten fra m.Perm

Grøn: Kalksten-sandsten-skifer fra Perm

Rød: Div. sedimentære bjergarter fra Perm-Trias.

Brun: Silt-sandsten-konglomerater fra Trias-Jura



Stalaktiter (figur 3, 5 og 9) er former, der vokser oppefra og ned og dannes ved afsætning af  $\text{CaCO}_3$  ved dryppunkter, f.eks. hvor vandet trænger frem fra sprækker.

Hår- eller stråstalaktiter er lange, tynde former med en årlig væksthastighed på 0,2-0,5 mm. Ved hvert dryp afsættes en mikroskopisk ring af calcit således, at der opstår et hult rør på ca. 5 mm. i diameter i midten af den voksende stalaktit. Hvis dette lille hule rør tilstoppes, vil vandet i stedet løbe ned langs ydersiden og udfælde  $\text{CaCO}_3$  i et radierende mønster omkring det tilstoppede rør. Det fører til kegleformede stalaktiter, hvor calciten nu udfældes 'lag på lag' i en struktur, der minder om træåringer.

Stalagmitter (figur 5) vokser nedefra og op. Eksemplarer med en ensartet diameter i hele stalagmitens længde vidner om uændrede forhold i huleatmosfærens sammensætning, dryphastighed, vandets temperatur og  $\text{CaCO}_3$ -indhold. Kegleformede stalagmitter skyldes aftagende dryp- og udfældningshastighed, mens store komplekse stalagmitter dannes på grund af dråbernes vekslende størrelse, ændringer i faldhøjde eller skiftende dryppunkter i kombination med ovennævnte parametre. Vækstraten for stalaktiter og stalagmitter er typisk i størrelsesordenen 0,01-3,8 mm pr. år.

Hvor stalagmitter og stalaktiter vokser sammen, eller når henholdsvis gulv eller loft, opstår søjler, hvis videre vækst styres af  $\text{CaCO}_3$ -udfældning fra en tynd 'vandfilm' på overfladen. En af de størst kendte søjler kan ses i Cueva de Nerja hulerne i Sydspanien (figur 5).

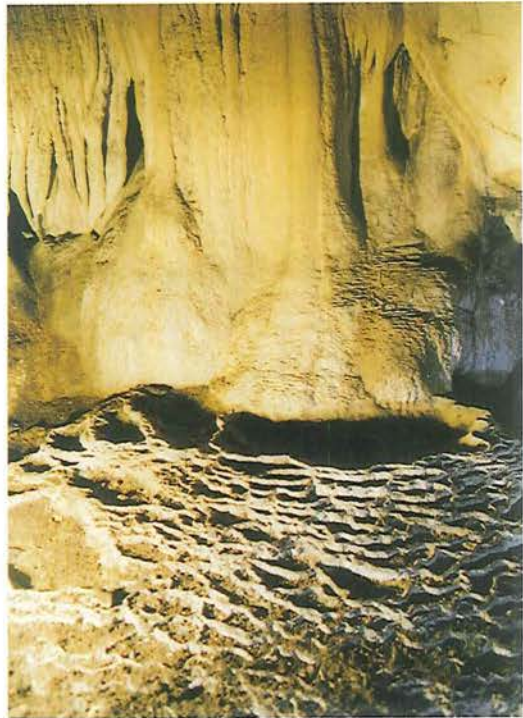


Figur 5. Stalaktiter og stalagmitter i Cueva de Nerja hulerne i Sydspanien

Dråber, der løber ned langs væggene i faste baner, udfælder  $\text{CaCO}_3$  i lange, bugtede og foldede gardiner ('drip curtains') og draperier.

'Flowstone' (figur 6) opstår, hvor udstrakte 'vandfilm' løber ned over vægge, gulve og skrånende flader. De kan antage mange former og er ofte associeret med 'rimstone'-dæmninger (figur 6) - trappeformede dannelser af (oprindeligt) vandfyldte bassiner adskilt af tynde vægge. Ved vandets bevægelse hen over eksisterende ujævnheder sker der en mikroskopisk bobledannelse, hvorved kuldioxid afgives til luften, og  $\text{CaCO}_3$  udfældes. Denne proces er selv-





*Figur 6. Tykke lag af 'flow-stone' afsat på vægge og gulv i Tham Din hulen i Nan Provinsen. Forrest ses op til 1,5 m store nu udtørrede 'rim-stone' bassiner*

forstærkende, idet den kontinuerlige udfældning på de samme steder skaber stadig større ujævnheder, der igen forstærker bobledannelsen og derved udfældningen af  $\text{CaCO}_3$ . Der opbygges herved langsomt serier af trappetrin, bassintrin og bassinvægge.

I kalkstensområder vil vandfald i huler og på jordoverfladen til stadighed kunne udbygge deres egen form på grund af ovennævnte proces, og man taler således om konstruktive vandfald (figur 7).

Nogle få ekcentriske former vokser tilsyneladende uden at tage hensyn til tyngdekraften. Heliktiter gror i alle retninger og menes at være et resultat af forhøjet hydrostatisk tryk, der presser vand mættet med  $\text{CaCO}_3$  ud fra kapillærrum i lofter og vægge. Vinklede, kurvede og spiralsnoede former afspejler gradvise ændringer i calcitkrystallernes orientering - muligvis på grund af urenheder i form af fremmede ioner, der forstyrrer krystalgitternes ellers regulære opbygning. Skjolde er igen en anden type, som danner to parallelle plader, der vokser ud fra væggene i alle tænkelige vinkler.

I arktiske og subarktiske egne kan drypstensdannelser af is dominere over kemiske udfældninger. Der kendes også eksempler i hulerne på 50 cm store, hexagonale plader af is dannet ved fortætning af vanddamp fra luften.

Med til de kemiske aflejringer må også regnes forskellige evaporituddannelser i aride og semiaride klimater, samt egentlige mineraliseringer af f.eks.:

halit ( $\text{NaCl}$ ), calcit og aragonit ( $\text{CaCO}_3$ ), gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), variscit ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), taranakit ( $(\text{K}, \text{NH}_4)\text{Al}_3(\text{PO}_4)_3(\text{OH}) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), woodhouseit ( $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ), hydroxylapatit ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ), opal ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )



*Figur 7. Konstuktivt vandfald i Nam Tok Roi Chan Phan Wang, Trang Pro-  
vinsen, Syd Thailand. De ejendommelige former er opstået ved kontinuerlig  
udfældning af  $\text{CaCO}_3$  fra det brusende vand.*

De kemiske aflejringers interne struktur afhænger af type og vækstbetingel-  
ser og varierer fra en løs, melagtig konsistens over en fast, grynet til en  
hård, krystallinsk struktur. På sidstnævnte ses calcitkrystallernes spalteflader  
på afbrækkede stykker, og ofte glimtende, sukkeragtige krystaller på over-  
fladen (figur 8).

Aflejringerens forskellige farver skyldes urenheder langs krystallflader, i  
krystalgitre eller på oversiden af vækstflader. Forskellige metalforbindelser

giver mange farver fra sort (Fe,Mn) over gullige, brunlige og rødlige (Fe) til grønne farver (Cu). Endvidere er urenheder af organisk oprindelse (bakterier og alger) samt støv og mudder af stor betydning.



*Figur 8. Overflade af stalagmit i Tham Lan The hulen , Nan Provinsen. Bemærk calcitkrystallerne i de op til 8 mm store skåle og sammenlign formen af sidstnævnte med 'rimstone' bassinerne på figur 6.*

#### **Klastiske aflejringer.**

Disse stammer enten fra eksterne kilder og er transporteret 'indendørs' af gravitative, fluviale eller æoliske processer, eller fra interne kilder, hvor nedstyrtet materiale fra lofter og vægge udgør en væsentlig bestanddel (fig. 9). Floder og vandløb kan eksempelvis skabe deltaer, flodterrasser, flettede og meandrerende løb, og i søbassiner afsættes finkornede, eventuelt varvige, sedimenter af ler og silt.

I huler med tidligere eller nuværende periglaciale forhold og/eller glacial aktivitet vil sedimenterne i indgangspartiet ofte bære præg af jordflydningsprocesser, ligesom der kan optræde till- (moræne-) eller smeltevandsaflejringer.

Vindaflejrede sedimenter er i sagens natur mindre almindelige i huler end uden for. Dog er sand- og løssakkumulationer nær åbningen ret almindelige i tørre klimater, hvor man desuden har fundet klitdannelser af sand, blæst ind gennem åbne sprækker og skakte.

#### **Biogene aflejringer og kulturlag.**

Fra sådanne aflejringer stammer mange berømte fund af fortidsmennesker og -dyr, f.eks. Peking-manden fra Mellem Pleistocæn fra Zhoukoudian-

hulen i Kina og store mængder knoglemateriale fra uddøde, kvartære dyrearter. De fleste fund er gjort i hulernes ydre dele samt på bunden af åbne skakte, der har fungeret som dyrefælder.

I hulernes indre er selve biomassen af levende organismer generelt for ringe til at give betydelige aflejringer, men guano fra fugle- og flagermuskolonier kan ophobes i metertykke lag. De vil langsomt omdannes til forskellige fosfater og nitrater, der kan påvirke vandets kemiske sammensætning og opløsningssevne.

I og ved selve åbningen, samt i kamre med indfaldende dagslys, kan der optræde en speciel og varieret flora. I de mørke afsnit er plantevækst absolut minimal - dog kan visse alger, bakterier og svampe trives under sådanne vilkår, hvor de tillige kan påvirke udfældningen af calciumkarbonat. Træstammer, grene, blade og andet plantemateriale kan med strømmende vand føres langt ind i hulens indre, hvor de vil indgå i de klastiske aflejringer.

### **Kulturlag.**

Menneskets tilstedeværelse repræsenteres af kulturlag, der kan indeholde spor efter ild, knuste skaller, redskaber, potteskår, flækkede dyrekogler m.v. Endvidere ses i mange huler verden over smukke eksempler på, hvordan 'datidens speleologer', har udfoldet deres kunstneriske talent i form af malerier og indkradsede symboler.

### **Stratigrafi, palæomiljø og dateringer.**

At udrede stratigrafien i huleaflejringer kan være en besværlig proces på grund af de fysiske rammer og den hyppige tilstedeværelse af 'falske gulve' (figur 2G), d.v.s. lag af 'flowstone' udfældet oven på løse sedimenter, som senere fjernes ved vanderosion og eventuelt erstattes af yngre aflejringer.

Tidligere var især vertebratfossiler den røde tråd i sådanne undersøgelser, men i dag benyttes mange forskellige metoder. Sedimentologiske, palæontologiske og palynologiske undersøgelser af de klastiske og biogene aflejringer kan fortælle om den daværende lokale flora og fauna, samt om jordbunds- og klimaforholdene. Forladte kanaler, terrasser, erosionsspor, vandstandsmærker og forskellige sedimenter i forskellige niveauer, samt typen, hyppigheden og fordelingen af de kemiske afsætninger giver oplysninger om vandets tidligere bevægelsesmønster og herved også om tidligere tiders tektoniske og klimatiske begivenheder.

I kølige klimater skyldes varvige sedimenter ofte indtrængende smeltevand fra nærliggende isdækker, mens de i troperne repræsenterer nedbørsvariationer styret af monsunperioderne. På sådanne finkornede søsedimenter kan der foretages palæomagnetiske dateringer.

Vindaflejrrede sedimenter antyder umiddelbart et nedbørsfattigt klima, men siger ikke direkte noget om de daværende temperaturforhold.

I Europa og USA har undersøgelser i huler i områder med glacial aktivitet muliggjort opstilling af lokale glacialstratigrafier for dele af kvartærtiden på basis af indpressede till- og smeltevandssedimenter.

Da drypstendannelsen som nævnt er afhængig af vandtilførslen, har man ud fra fordelingen og hyppigheden af drypsten samt ved at anvende  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  - isotopanalyser af disse opstillet en palæoklimatologisk model for de sidste 370.000 år opdelt i stadialer/glacialer, interglacialer og interstadialer. De kolde og mere tørre stadialer karakteriseres af en begrænset  $\text{CaCO}_3$ - udfældning, mens de varmere, fugtigere interglacialer og -stadialer favoriserede udfældningen.

Det er muligt at aldersbestemme drypsten og 'flowstone' ved hjælp af  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -, ERS- og thermoluminescens-dateringer. De fleste læsere har næppe adgang til sådanne faciliteter, men at bestemme alderen på f.eks. en 107 cm lang stalagmit med et målebånd, lommeregner og de tidligere nævnte vækstrater, går imidlertid ikke. Dertil varierer vækstbetingelserne alt for meget - bl.a. kan væksten helt ophøre i årtusinder.

Forestiller vi os, at stalagmiten havde haft en konstant vækst på 3,8 mm. pr år ville alderen være ca. 281 år - eller hele 107.000 år, hvis væksthastigheden kun havde været 0,01 mm pr. år. Den 'sande' alder? - isotopdateringer af nævnte stalagmit gav i alt fald et andet resultat: 690.000 år! Ej heller huler blev skabt på én dag.

