

Ussingit

Ussings beskrivelser og tolkninger har stadig efter snart 100 år gyldighed, selvom nye undersøgelser specielt i de sidste år har nødvendiggjort større eller mindre justeringer. Mange geologer, der har arbejdet i Sydgrønland under senere ekspeditioner har kunnet 'bekræfte Ussings arbejder'. Ussing stod desuden for den banebrydende udforskning af isafsmeltningen i Jylland i slutningen af den sidste istid og for inddelingen af Bornholms grundfjeld.

Mineraler, der findes sammen med sorensenit, steenstrupin og ussingit:
Analcim ($NaAlSi_2O_6$, mikroklin ($KAlSi_3O_8$), natrolit ($Na_2(Al_2Si_3)O_{10}.2H_2O$, pectolit ($Na,Ca_2Si_3O_8(OH)$, sodalit ($Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$), ægirin ($Na,FeSi_2O_6$,)
arfvedsonit ($Na_{2-3}(Fe,Mg,Al)_5Si_8O_{22}(OH,F)_2$),

Beryllium-mineralerne:beryllit ($Be_3SiO_4(OH)_2.H_2O$), Chkalovit ($Na_2BeSi_2O_6$), og tugtupit ($Na_4AlBeSi_4O_{12}Cl$),

Niobium-mineralerne: epistolit ($Na_2(Nb,Ti)_2Si_2O_9.nH_2O$),
gerasimovskit ($(Mn,Ca)_2(Nb,Ti)_5O_{12}.9H_2O$, ilímaussit ($Ba_2Na_4CeFeNb_2Si_8O_{28}.5H_2O$,
nenadkevichite $(Na,Ca,K)(Nb,Ti)Si_2O_6(O,OH).2H_2O$,
niobophyllit $(K,Na)_3(Fe,Mn)_6(Nb,Ti)_2Si_8(O,OH,F)_3$, samt chalcothallit ($Cu_3Tl_2$), cuprostibit ($Cu_2(Sb,Tl)$, galena PbS, molybdænglans (MoS_2), sphalerit (ZnS)

VARV

NR 3 BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER 1995



VARV KONCENTRERER SIG OM KRYSTALLISATION. I TO ARTIKLER FORTÆLLES OM KRYSALLISATION DELS I EN BASALTISK SMELTE OG DELS I PEGMATITER, OG OM HVORDAN FORSKELLIGE MINERALER DANNNES .

DESUDEN INDLEDES EN ARTIKELSERIE OM MINERALER OPKALDT EFTER DANSKERE.

VARV FORTSÆTTER SIN FØLJETON OM FISK. DENNE GANG OM FISK FRA YNGRE DANSKE KALKBJERGARTER.

ISSN 0105-6301 1995 - 12 - 01

Forsidebillede: Basaltiske gange (dolerit), Vestsverige

Forfattere til artikler i dette nummer kan kontaktes på følgende adresser:
Niels Bonde og John Rose-Hansen: Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 København K.

Sven Maaløe: Universitetet i Bergen, Geologisk Institutt, afd. A, Allégt. 41, N-5007 Bergen.

Richard Wilson og Anita S. Holmboe: Geologisk Insitut, Århus Universitet, 8000 Århus C

----------VARV----------
VARV er udgivet med støtte fra Kulturministeriets bevilling til almenkulturelle tidsskrifter.

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350-København K

Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut, København

Redaktion: Asger Berthelsen, Bjørn Hageskov, Jens Konnerup-Madsen, Lena Madsen og Svend Pedersen (ansvarshavende)

Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Lena Madsen, Bjørn Hageskov og Svend Pedersen.

Lay-out: Bjørn Hageskov og Svend Pedersen

Repro: Tage Wilken a/s, København

Tryk: Levison+Johnsen+Johnsen a/s, København

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 100 kr i abonnement for 1996.
Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til:

VARV, postgiro 9 06 88 80,

eller 100 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 100 NOK til VARV's norske postgiro: 0806 1923234.

Adresseændringer bedes meddelt VARV!

© 1995 VARV. Eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

I 1874, 1876 og 1877 besøgte Steenstrup bl.a. Ilimaussaq området, hvor der blev indsamlet mange mineraler og bjergartsprøver, som endnu danner grundstammen i Geologisk Museums samlinger fra Ilímaussaq. I 1888 og 1899 besøgte han atter Ilimaussaq for at indsamle prøver til erstatning for det materiale, der gik tabt under Christianborgs Slots brand i 1884. Han indsamlede endvidere 59 tons eudialytrige bjergarter til Kryolitselskabet Øresund til opbearbejdningsforsøg. Desværre kom der intet ud af disse forsøg.

Steenstrup har beskæftiget sig med megen forskellig geologi lige fra arbejdet i Ilímaussaq området, hvor han foruden de magmatiske bjergarter studerede den røde sandsten (Igalikosandstenen), til kul og basalt på Disko, videre til gletschere og arkæologiske/historiske studier af Østerbygden.

USSINGIT: $Na_2AlSi_3O_8(OH)$. Beskrevet i 1914 i Medd. om Grønland 51, side 105

Ussingit er et farveløst til violet mineral, der krystalliserer triklint (krystaller kendes ikke). Mineralet kan have tvillinger. Hårdheden er 6,5 og densiteten 2,49g/cm^3. Den violette farve forsvinder ved opvarmning, men genfremkaldes ved røntgenbestråling. Farven skyldes måske centre af $(SO_4)^{2-}$ i krystalstrukturen. Ussingit findes i op til 2 meter tykke årer sammen med mineralet analcim og en række andre usædvanlige mineraler (side 96).

Professor O.B. Bøggild opkaldte i 1913-14 ussingit efter sin forgænger i embedet, professor N.V. Ussing (1864-1911), der gjorde en stor indsats for udforskningen af geologien i Sydgrønland, ikke mindst i Ilimaussaq.

Resultaterne af Ussings arbejder foreligger først og fremmest i den i 1912 efter hans død publicerede monografi om geologien i Julianehaab distrikt. Ikke mindst det geologiske kort over Ilímaussaq og hans beskrivelse og tolkning af kompleksets bjergarter er af meget høj kvalitet. Geologer, der har fortsat Ussings kortlægning, er ofte blevet forbløffet over hans eminente iagttagelsesevne og fortolkninger af vanskelige geologiske forhold.



N.V Ussing

STEENSTRUPIN: $Na_{12-x}H_xCa(La,Ce,Nd)_6(Mn,Fe,Th,Zr,U)_3(Si_6O_{18})_2((P,Si)_4)_6(OH,Cl)$
Beskrevet i 1881 i Medd. om Grønland, 2, side 73

Steenstrupin er et mørkebrunt til sort mineral, der krystalliserer trigonalt og ofte har veludviklede krystalflader. Mineralet kan være metamikt, d.v.s. at krystalstrukturen er ødelagt af stråling fra mineralets uran- og thoriumatomer. Hårdheden er 4-5, densiteten 3.4-3.5 g/cm^3.

Steenstrupin er hovedbæreren af uran og thorium i Ilimaussaq komplekset. Her findes flere radioaktive forekomster af lav lødighed, der fra 1955 til midt i 1980erne var genstand for stor interesse på grund af uranindholdet. Interessen i dag skyldes bl.a. et stort indhold af grundstoffer, som lanthanider, zirkonium etc.

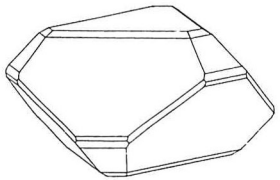
Steenstrupin blev af Johannes Lorenzen (1855-1884) i 1881 opkaldt efter Knud Johannes Vogelius Steenstrup (1842-1913).

Steenstrup, der af uddannelse var farmaceut, foretog ialt 9 rejser til Grønland. I den første i 1871 skulle han som medlem af en svensk ekspedition varetage Danmarks interesser og fra Disko hjembringe jernblokke som Nordenskjold året i forvejen havde fundet og beskrevet som meteorsten. Steeenstrups påvisning af, at jernet var tellurisk, dvs Jordisk, vakte stor opsigt i den videnskabelige verden.



Knud J.V. Steenstrup





Steenstrupin krystal

Hvor vokser krystallerne i et magmakammer ?

J. Richard Wilson & Anita S. Holmboe

Når en lavastrøm størkner, vil de vulkanske bjergarter, der derved dannes, består af en finkornet grundmasse, som sædvanligvis indeholder større krystaller (fenokryster) og nogle mere eller mindre uregelmæssige hulrum -vesikler (fig. 1). Den finkornede grundmasse og de uregelmæssige hulrum er resultatet af en meget hurtig størkning på Jordens overflade, mens fenokrysterne fortæller om smeltens størkningshistorie i dybet. Tilsvarende bjergarter, der er krystalliseret dybere i Jorden (plutoniske bjergarter), er afkølet langsomt. De består udelukkende af krystaller og er størknet under helt anderledes forhold. Hvor man i vulkanske bjergarter direkte kan observere lavastrømmenes størkningsforhold, kan kendskabet til størkningsprocesser i plutoniske bjergarter kun opnås på en mere indirekte måde. I denne artikel vil vi gennemgå nogle aspekter ved krystallisation i magmatiske bjergarter på grundlag af observationer fra vulkanske bjergarter.



Figur 1. Basaltisk lava med små grønne olivin- strøkorn (fenokryster) og blærerum (vesikler). Enkelte af vesiklerne er senere undfyldt af et hvidt mineral. Foto: O.B. Berthelsen.

Lavastrømme

En lavastrøms grundmasse, der oftest udgør den dominerende del af bjergarten, var engang flydende lava, der størknede meget hurtigt ved afkøling på jordoverfladen. I nogle tilfælde har afkølingen fundet sted så hurtigt, at der ikke er dannet krystaller: lavaen er derved størknet som naturligt glas. Man kan som en første tilnærmelse sige, at mineralkornenes størrelse i grundmassen i vulkanske og plutoniske bjergarter er proportional med afkølingshastigheden.

Lavaens egenskaber afhænger af lavatypen. På Island og Hawaii er de fleste lavastrømme af basaltisk sammensætning. Basaltisk lava er relativt letflydende - den har en lav viskositet - og kan derfor flyde over store afstande. I kontrast til denne er den rhyolitiske lava ekstremt sejtflydende (høj viskositet) og kan derfor ikke flyde særlig langt. Denne lavatype danner ofte rhyolitisk glas - obsidian - som eksempelvis findes på Lipari-øen.

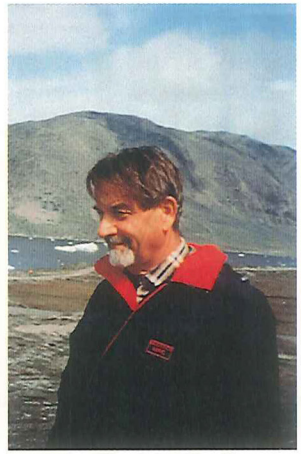
Vesikler i en lava er et bevis for, at en gasfase, for det meste vand, er undsluppet lavaen. Den gas der slipper ud, mens lavaen stiger op mod Jordens overflade, samt mens den flyder ud på jordoverfladen, kan sammenlignes med det CO_2-udslip, der opstår, når man åbner en øl. Øl eller andre væsker under tryk kan indeholde betydelig mere opløst gas, end det er muligt ved atmosfærisk tryk. Når ølkapslen fjernes, vil trykket i flasken falde, og gassen vil slippe ud. Øl har en lav viskositet og boblerne slipper hurtigt ud, mens flydende lava har så høj en viskositet, at den undslupne gas indfanges som bobler. Når lavaen med tiden overlejres af yngre lavastrømme og/eller sedimenter, kan vesiklerne udfyldes af materiale afsat af cirkulerende vandige opløsninger (fluider). Resultatet er dannelsen af 'mandelsten'.

Mange størknede lavastrømme indeholder en stor mængde fenokryster, sædvanligvis bestående af mere end een mineralfase. Magmatiske bjergarter, der indeholder sådanne store krystaller i en mere finkornet grundmasse, kaldes porfyriske. Fenokrysterne er ofte jævnt fordelt i porfyriske, vulkanske bjergarter. De findes også i de fødekanaler, hvorfra vulkanen har fået tilført materiale (fig.2). Fenokrysterne er derfor et bevis for krystalvækst før lavaudbruddet.

Magmakamre

Under jordens overflade indeholder smeltemasserne, der giver ophav til lavaen, således opløst gas og normalt også krystaller i suspension: denne blanding kaldes magma. Under mange vulkaner findes store mængder af magma i såkaldte magmakamre (fig. 2). I magmakammeret vil magmaet gradvist afkøles, og der vil ske en dannelse af krystalkim (nukleation), der

Henning Sørensen (1926-), der var ansat ved Geologisk Institut i København fra 1953 til 1992, siden 1962 som professor i geologi (petrografi), er internationalt kendt for sin udforskning af alkaline bjergarter, herunder først og fremmest for en omfattende indsats ved udforskningen af Ilímaussaq komplekset, en udforskning han ledede i mange år. Han har blandt andet fundet og beskrevet mineralet tugtupit. Henning Sørensen, der er præsident for Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab, er stadig meget aktiv inden for udforskningen af alkaline bjergarter og disses mineler.



Henning Sørensen

Mange af de geologiske kandidater, der i dag er ansat ved Københavns Universitet, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, Miljøministeriet og i det private erhvervliv, har skrevet specialer baseret på Ilímaussaq kompleksets mineralogi, petrologi, hydrogeologi og miljøgeologi.

Sorensenit er farveløst, hvidt eller rødligt med silkeglans. Hårdheden er 5-5½ og densiteten 2.9 g/cm^3 .Kemisk er det et silikat med en meget sjælden kombination af grundstofferne tin og beryllium. Mineralet findes ofte som lange tavleformede, undertiden bøjede, krystaller, der kan være op til 10 cm lange. Sorensenit krystalliserer monoklint og kan danne gennemvoksningstrillinger.

Sorensenit optræder i ofte zonare analcimrige årer med en rand rig på mikroklin, arfvedsonit og steenstrupin og en kerne rig på analcim, sodalit og natrolit samt andre usædvanlige mineraler (side 96). Sorensenit er et meget smukt mineral som kan anvendes om smykkesten.



Sorensenit

MINERALER - opkaldt efter danskere I

John Rose-Hansen

Som de første eksempler på mineraler opkaldt efter danskere er valgt tre mineraler fra Ilimaussaq komplekset i Sydgrønland (Varv 1967,2).

ILIMAUSSAQ KOMPLEKSET I SYDGRØNLAND, der er ca 1120 millioner år gammelt, er en af de mest kendte minerallokaliteter i Verden. I komplekset er fundet ca. 200 forskellige mineraler, hvoraf mange for første gang er fundet og beskrevet her. Nogle kendes udelukkende fra Ilímaussaq, andre også fra Kolahalvøen i det nordlige Rusland og fra Mont-St. Hilaire i Quebec, Canada. Derfor har geologer fra hele Verden, herunder fra Rusland, besøgt Ilimaussaq komplekset, og over 400 publikationer er udarbejdet om dets geologi og mineralogi.

Ilímaussaq komplekset er dannet ved størkning af et magma under nogle få kilometer tykt dække af lava og sandsten. Efterhånden som magmaet størknede, blev restmagmaet beriget på gasser som fluor, chlor og vand samt på sjældne grundstoffer som lithium, uran, thorium, niobium og beryllium.

Koncentrationen af gasser bevirkede, at trykket i magmakammeret steg. Medens en sådan trykstigning normalt betyder, at der dannes revner og sprækker, gennem hvilke gasser og de sjældne grundstoffer forsvinder, har det overliggende lag af sandsten og lava gjort, at dette ikke er sket i Ilímaussaq komplekset.

Dette har været en væsentlig årsag til, at der i Ilímaussaq komplekset er dannet usædvanlige mineraler og bjergarter. Som eksempler på mineraler med en særpræget kemisk sammensætning kan nævnes sorensenit, steenstrupin og ussingit.

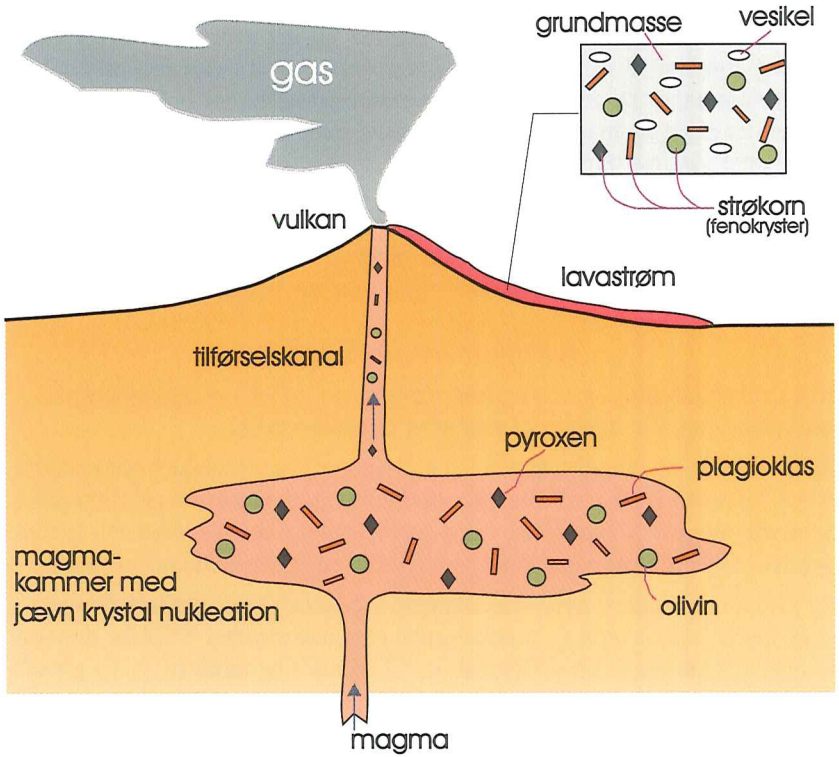
Tre sjældne mineraler opkaldt efter kendte danske geologer - hvoraf Sorensenit kun kendes fra Ilímaussaq.

I de næste numre af VARV vil gennemgangen af mineraler opkaldt efter danskere fortsætte.

SORENSENIT: $Na_4SnBe_2Si_6O_{16}(OH)_4$. Beskrevet i 1965 i Medd. om Grønland, 181, 1.

Sorensenit blev fundet i 1962 af en dansk ekspedition, men blev først beskrevet i 1964 af bl.a. de russiske mineraloger E.I. Semenov og G.I. Gerassimovsky, der opkaldte mineralet efter professor Henning Sørensen.

medfører vækst af krystaller. Fenokryster i porfyrisk lava ser ud til at have nukleeret og vokset overalt i magmakammeret. Denne proces, hvor krystaller nukleerer spontant overalt i smeltemassen, kaldes 'homogen nukleation' og kræver, at magmaet er overmættet med de mineralfaser, der kan være relevante for det pågældende magma. I et basaltisk magma vil et eller flere af mineralerne olivin, pyroxen og plagioklasfeldspat kunne nukleere og vokse til fenokryster. Dette kræver dog en relativt hurtig afkøling i et magmakammer, der ligger tæt ved Jordens overflade (se fig.2).



Figur 2. Vulkansk miljø med magmakammer beliggende højt i jordskorpen hvor temperaturen er lav i forhold til temperaturen i magmakammeret.

En smelte, der befinder sig i et dybtliggende magmakammer, der ikke er knyttet til en vulkan, vil størkne langsomt. I et sådant magmakammer optræder homogen nukleation sandsynligvis ikke overalt i kammeret (fig. 3). Nukleationen vil antagelig ske, hvor temperaturforskellen (temperaturgradienten) mellem magma og den omgivende sidesten er størst. Størstepar-

ten af varmetabet under afkølingen af magmaet vil være oppe ved taget, hvor sidestenen er nærmest jordoverfladen og dermed koldest. Derfor finder de fleste krystalnukleationer sted i magmakammerets tagzone ved A i figur 3. I takt med udkrystallisationen af olivin, plagioklas og pyroxen i et basaltisk magma øges indholdet af volatiler (for det meste H_2O) i den resterende smelte. Ved højeret volatilindhold kan vandholdige mineraler (f.eks. amfibol og glimmer) begynde at udkrystallisere.

I store magmalegemer må man forvente bevægelse - såkaldt termal konvektion - på grund af temperaturforskelle i magmaet. Afkølingen ved taget forøger magmaets vægtfylde (densitet). Herved vil det synke ned langs væggene og erstattes af varmere magma, der stiger opad i den centrale del af magmakammeret. De langsomme konvektionsstrømme vil transportere krystalkim fra taget til magmakammerets gulv, hvor de herefter vil bundfælde ved 'crystal settling' (B i fig. 3).

'Crystal settling'

En første tilnærmelse til krystallernes opførsel i smeltemasser er, at de er kugleformede - sfæriske - partikler og derfor vil bundfælde ifølge Stokes lov:

$$\text{hastighed} = 2r^2g(d_c-d_m) / 9v$$

hvor r = krystalradius, g = tyngdeaccelerationen, (d_c-d_m) = krystaldensitet - magmadensitet, v = magmaets viskositet i enheden poise.

Figur 4 viser at olivinkrystaller (d_c= 3.8g/cm^3) samt plagioklaskrystaller (d_c= 2.7g/cm^3) i et basaltisk magma med en antaget viskositet på 1000 poise og en densitet på 2.65g/cm^3 vil synke ned gennem magmaet med en - geologisk set - rimelig hastighed (fra flere meter til flere hundrede meter pr. år).

For granitiske smelter, hvor man antager en viskositet på 100.000.000 poise og en densitet på 2.3g/cm^3, er situationen en ganske anden. Typiske mineraler i granit som f.eks. alkalifeldspat (d_c= 2.6g/cm^3) og biotit (d_c = 3.1 g/cm^3) vil synke så langsomt, at 'crystal settling' ikke kan være en betydende proces for krystallisationen af granitiske bjergarter. Det er derfor sandsynligt, at granitiske magmaer krystalliserer fra sidevæggene og indefter i magmakammeret.

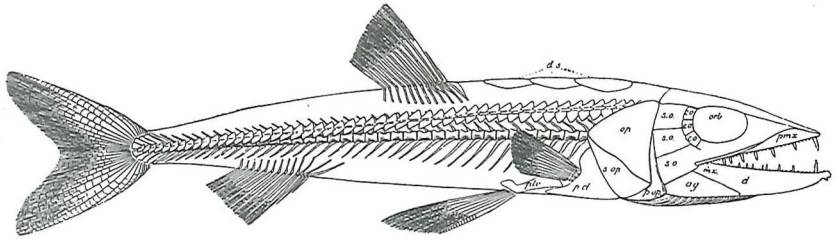
I mange tilfælde er krystallisationsretningen ikke bevaret i plutoniske bjergarter. Man kan ikke se, om bjergarten er krystalliseret fra taget mod bunden, fra sidevæggene og ind mod midten eller fra bunden mod toppen. Dette er derimod ikke tilfældet i forbindelse med lagdelte intrusioner, hvor lagdelingen repræsenterer en fremrykkende krystallisationsfront.

Gravegangen indeholder mange knoglerester og skæl af benfisk, og nogle af dem er så fint bevaret, at de kan bestemmes ret nøje. Der er en meget flot ca. 2 cm lang underkæbe med store, slanke, sylespidse rovtænder og også flere ret store mønstrede skælplader, begge dele karakteristiske for Eurypholis og nært beslægtede former af gruppen enchodontider. Denne uddøde gruppe var rigt repræsenteret i havet over hele verden i sen Kridttid. Den er beslægtet med nutidige dybhavsfisk som aulopodider og synodontider (på engelsk 'lizard-fisk', dvs. øglefisk). Holosteus fra Moleret, som er omtalt i VARV 1994,2, placeres ofte nær disse former. Enchodonter er rovfisk med store hoveder og ofte kolossale hugtænder forrest i kæbe og gane. Enchodus' hugtænder findes ofte løst - også i vort skrivekridt.

Gravegange med fisk i Köpinge Sandsten har været rapporteret langt tilbage, bl.a. som løse blokke i Nordtyskland og Danmark, men der er ikke rapporteret blokke med bestembare fiskerester, så måske er sådanne usædvanlige. I samlingerne i Lunds Universitets Geologiske-Palæontologiske Institut var det i hvert fald ikke muligt at finde nogle pæne fiskerester.

Stykkerne er i 1994 blevet erklæret danekræ på grund af sjældenheden, den pæne bevaringstilstand og bestembarheden. Når de er fundet her, er det jo danske fossiler, selvom oprindelsen ligger et stykke øst for landet (Skåne eller Østersøen). Det skal pointeres, at løse blokke i grusgrave er en vigtig kilde til fossiler, f.eks. stammer vor eneste pæne Danien-fisk fra en løs blok fra Djursland. Denne kan være taget op af gletchere her i landet - men det foregående eksempel viser, at fjerntransporterede blokke også kan indeholde potentielle danekræ. De ovennævnte fiskerester er altså gravet to gange, først ned af et ?krebsdyr, siden op ved hjælp af isen.

Siden stykket ovenfor blev danekræ er endelig fundet et par fine fiskerester i vort eget Øvre Kridt, nemlig i skrivekridtet på Stevns. Tommy Nielsen, Brønshøj, har fundet hoved og forreste del af kroppen af en ålefisk, faktisk lidt af en sensation på globalt plan. Det er den eneste ål, der kendes fra det seneste Kridt, Maastricht-etagen, og der kendes fra Kridttiden kun 4 andre åleformer, alle af Cenoman-etagen i begyndelsen af Øvre Kridt (ca. 100 mill. år). Samme finder har også nogle smukt bevarede kraniedele fra en primitiv pigfinnet benfisk - begge vil senere blive omtalt.

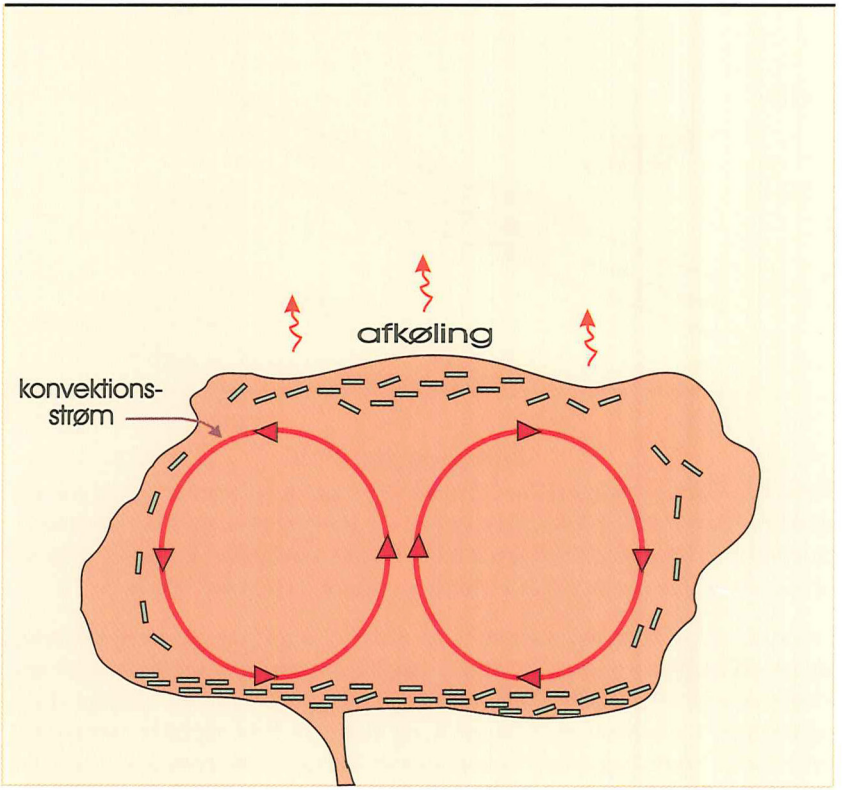


Figur 2. Eurypholis fra Øvre Kridt i Libanon rekonstrueret af Smith Woodward, 1901.



Figur 3. Hugtænder fra ganen af Enchodus fra skrivekridt på Stevns fundet af Ib Møller Nielsen, Vanløse (Foto: J. Aagaard).

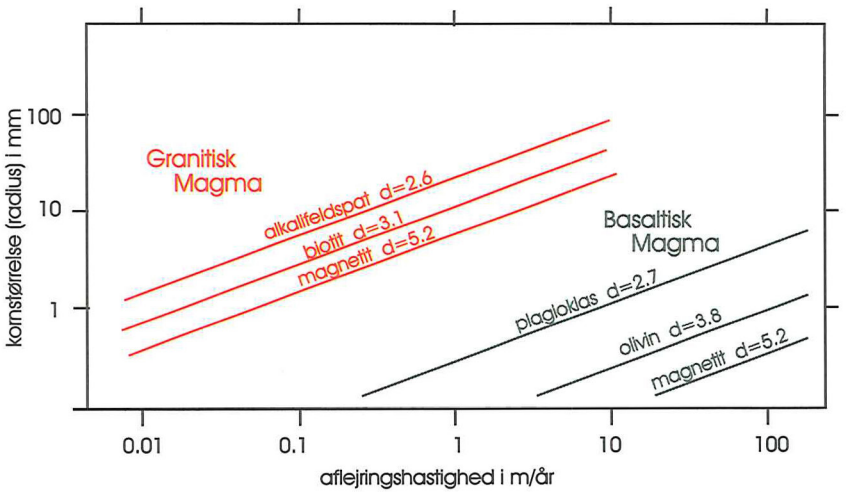
I 1992 fandt Peter Mortensen i en grusgrav i Davinder øst for Odense en løs blok af kalksandsten med sådanne fiskeforede 'terebellide'-rør. Bjergarten kendes ikke i det danske område og er blevet bragt hertil af gletchere eller smeltevand i den sidste istid. Det er den såkaldte 'Köpinge Sandsten' fra Skåne, hvis alder er Campanien, altså sen Kridttid, lidt ældre end vort skrivekridt.



Figur 3. Dybtliggende magmakammer. Krystalkim dannes ved taget A og føres ved konvektionsstrømme til B, hvor de aflejres ved 'crystal settling'.

Lagdelte intrusioner

Lagdelte intrusioner repræsenterer 'fossile' magmakamre og ved at studere disse kan man opnå viden om processer, man ikke direkte kan observere. Lagdelingen (fig. 5) gør det muligt at overveje stratigrafiske forhold som op/ned-relationer, lateral sammenligning af lag og bestemmelse af lagpakkens tykkelse. De fleste lagdelte intrusioner som for eksempel Skærgaard intrusionen i Østgrønland og Bushveld komplekset i Sydafrika består af bjergarter fra 'gabbro-familien' (se side 81), da de er krystalliseret fra et basaltisk modermagma. Lagdelingens orientering viser, at hovedparten af krystallisationen har fundet sted fra bunden og opad.



Figur 4. Relationerne mellem kornstørrelse og aflejringshastighed for mineraler i granitiske og basaltiske magmaer. d angiver mineralets densitet. Eksempelvis vil et magnetitkorn med en radius på 0.5mm synke ca. 1 cm/år i granitisk magma, mens det i et basaltisk magma vil synke 100 m/år.

I marine sedimenter repræsenterer de enkelte lagplaner gammel havbund, hvorimod lagplanerne i magmatiske lagdelte intrusioner repræsenterer den fremrykkende krystallisationsfront. Selve lagdelingen minder i høj grad om lagdelingen i sedimentære bjergarter og tidligere blev lagdelte intrusioner anset for at være 'magmatiske sedimenter' dannet ved 'crystal settling' fra magmaet. 'Crystal settling' er dog opgivet som den væsentligste forklaring på dannelsen af de lagdelte magmatiske bjergarter. Det er der flere grunde til.

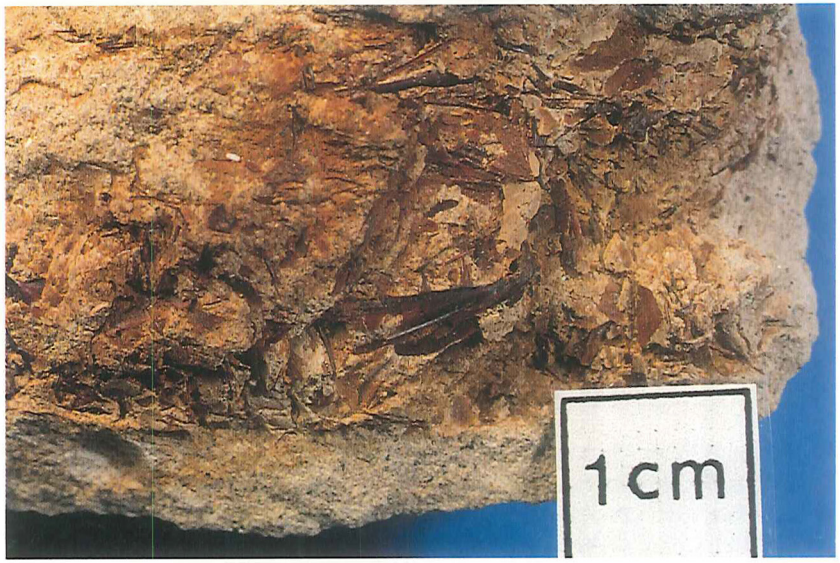
Densitetsproblemet

For at krystaller kan bundfældes i magmakammeret må deres densitet naturligvis være højere end magmaets densitet. Dette er tilfældet for malmminer-aler og magnesium- og jernrige mineraler som olivin og pyroxen, men ikke altid for de lettere calcium- og natriumrige plagioklasfeldspater (fig. 6). Et særligt karakteristisk træk ved lagdelte intrusioner er, at de første mineraler, der dannes, hovedsageligt er magnesiumrig olivin og pyroxen samt calcium-rig plagioklas. Denne type krystallisation, der kaldes fraktioneret krystal-lisation, bevirker, at det resterende magma bliver mere jernrigt. Når det basaltiske magma beriges i jern, forøges dets densitet. Samtidig bliver de krystalliserende plagioklaser mere natriumrige, og deres densitet vil falde.

'Gravet fisk'

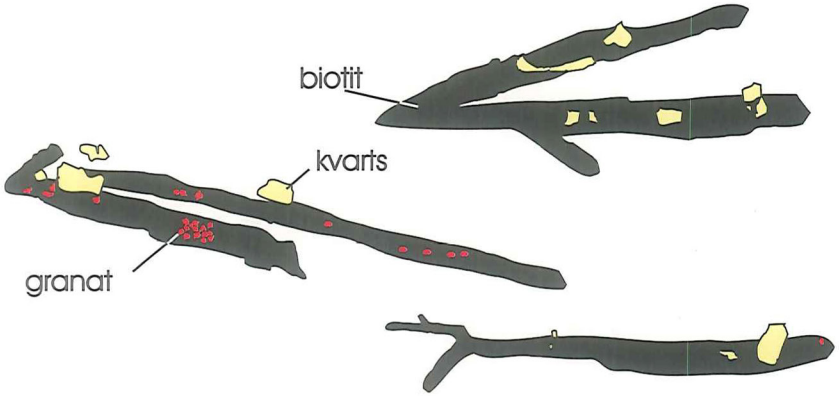
Niels Bonde

I vort danske skrivekridt er der næsten ingen bestembare rester af benfisk (VARV 1992,2), og der er tilmed kun meget få hajtænder. Udover hajtænder er der kun løse skæl og småknogler, som i nogle få tilfælde er koncentreret i rør, kaldet 'Terebellide'-rør. Disse rør er 1-3 cm i diameter. Rørene, der er gravegange, har fragmenterne bygget ind i væggen, og man mente i 'gamle dage', at det var børsteorm af terebellide-familien, der var ansvarlig for gravegangene. Det er nu nok nærmere krebsdyr af Thalianassa-gruppen. Disse krebsdyr laver endvidere de såkaldte 'ophiomorfer', dvs. slangeformede gange. 'Terebella'-rør kendes også fra vore tertiære aflejringer, bl.a. Danien-kalk og 'plastisk ler'. Derimod kendes de ikke fra det fiskerige molér, som i den øvre halvdel har ret mange gravegange, dog af en helt anden type.



Figur 1. Kæbe med spidse tænder af en enchodont som Eurypholis i gravegang i gletchertransporteret Köpinge Sandsten (Foto: J. Aagaard).

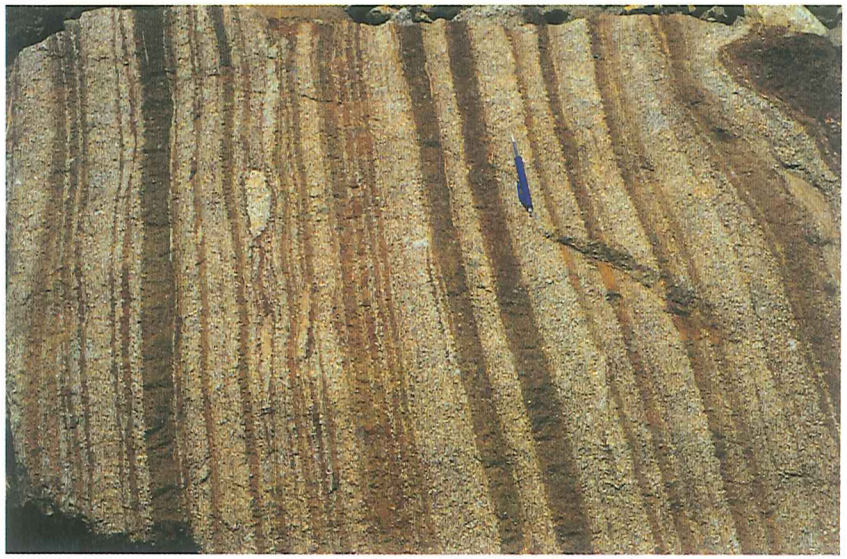
rør. Kvartsen - hvis den er ren nok - bliver undertiden også brudt til fremstilling af ren SiO_2. En del pegmatiter indeholder den lithiumholdige glimmer lepidolit. Lithium har interesse i forbindelse med atomreaktorer, idet lithium kan fusionere med hydrogen. Hvis denne fusion kan udnyttes, hvilket endnu ikke er givet, vil der være tilstrækkelig lithium i kendte pegmatitgange til verdens energiforsyning i mange år fremover.



Figur 6. 20-30 cm lange biotitkrystaller. Krystallerne er flade, ca 2 mm tykke og 1-3 cm brede. Deres omrids viser, at de voksede frit svævende i magmaet. Havde der været andre mineraler tilstede, ville deres form være bestemt af disse. Krystallernes udseende viser, hvilke der er dannet først.



Figur 7. Meterstore biotitkrystaller fra Li (se fig.1).



Figur 5A. Lagdelt gabbro uden gradering med lyse plagioklasrige og mørke olivinrige lag. En lys indeslutning ses til venstre for kuglepennen .

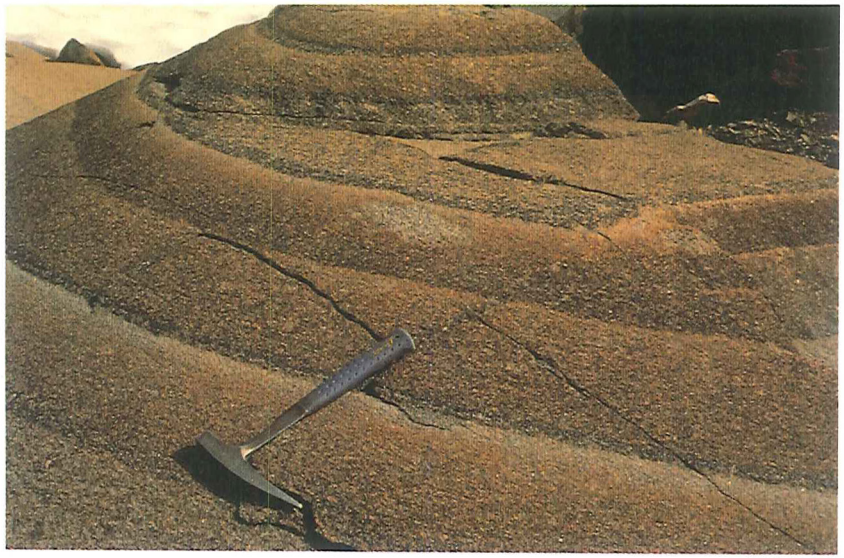
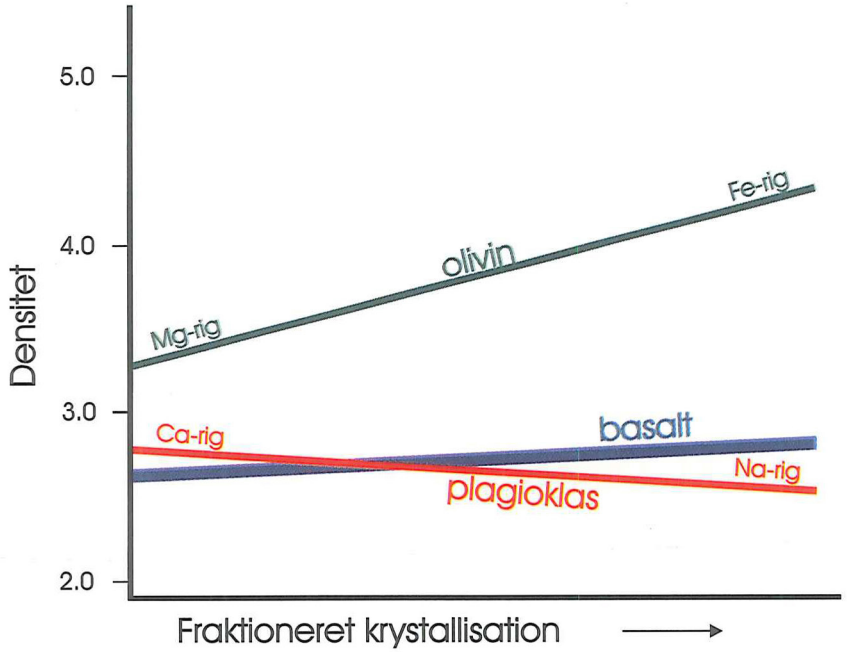


Fig 5B. Graderet lagdeling. Lagene er rige på olivin og pyroxen i bunden og bliver rigere på plagioklas mod toppen.

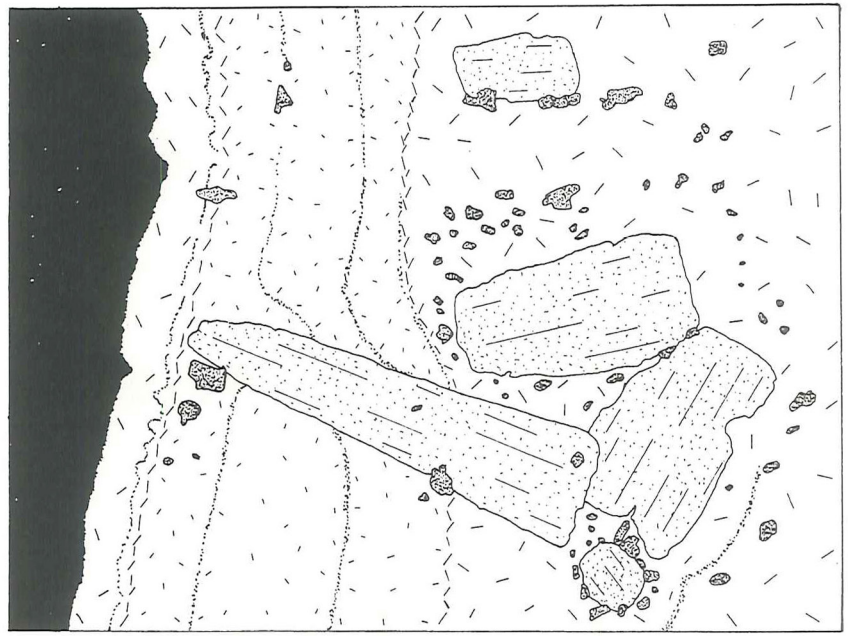


Figur 6. Densitetsændringer i mineraler og basaltisk magma med stigende grad af fraktioneret krystallisation. Bemærk at Ca-rig plagioklas vil kunne synke i basaltisk magma, mens dette ikke vil være tilfældet for Na-rig.

Under den videre fraktionerede krystallisation vil de to densiteter nærme sig hinanden og til sidst være ens. Når dette punkt er nået, vil plagioklaskrystallerne have en lavere densitet end magmaet og vil derfor ikke være i stand til at bundfældes i magmakammeret. Dette forhold er blevet dokumenteret dels ved laboratorieforsøg, dels ved beregninger. Alligevel finder man plagioklas rigt repræsenteret i bjergarter, der netop er krystalliseret fra bunden og opefter i alle lagdelte gabbrointrusioner, uanset om de er krystalliseret fra et magnesiumrigt eller et jernrigt magma.

I Skærgaard intrusionen er nogle af de lagdelte bjergarter dannet ved taget og vokset nedefter, ved sidevæggene og vokset indefter, samtidig med at andre lag er vokset fra bunden og opefter. Gabbroer, dannet ved tag og vægge, består af de samme mineraler som de gabbroer, der er dannet ved magmakammerets gulv. Bundfældes mineraler ved 'crystal settling' på magmakammerets gulv som et resultat af deres densitet, vil de ikke samtidig være i stand til at flyde ved taget. Densitetsproblemet med tilstedeværelsen af

Krystallisationen fra siden og ind mod midten bevirker, at de sjældne grundstoffer, som ikke indgår i de almindelige bjergartsdannende mineraler, bliver opkoncentreret ind mod midten. Derfor finder man som oftest mineraler som beryl og allanit i den centrale del af pegmatitgangene.

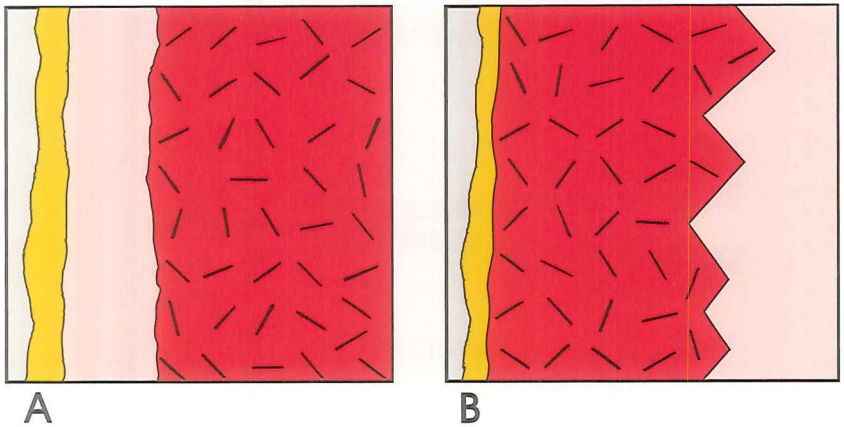


Figur 5. Til venstre ses pegmatitgangens sidesten (sort). Dernæst følger kontaktzonen med 1 mm store krystaller og flere lag af granat (prikket) udkrystalliseret som følge af opkoncentration af grundstoffer. En stor mikroklinkrystal er dannet i kontaktzonen og vokser indefter. Et stykke inde findes andre store mikroklinkrystaller omgivet af kvartskrystaller. Disse dannes fordi væksten af mikroklin øger indholdet af SiO_2 i magmaet omkring mikroklinkrystallerne.

Pegmatiter har været udnyttet til forskellige formål. De store formalede feldspatkrystaller er blevet brugt til porcelæn samt - for meget rene kvaliteters vedkommende - til tandkroneemalje. Knust feldspat har også været brugt til tandpasta. I dag anvender man dog kridt til tandpasta - det slider mindre. Pegmatiter indeholder ofte store muskovitkrystaller, der har været brugt til ovndøre i kakkelovne (marieglas) og som elektrisk isolation i radio-

stemmer, om der på et givet tidspunkt dannes pegmatit eller aplit. Som ovenfor omtalt dannes de store pegmatitkrystaller fra et magma med gasbobler. Hvis trykket i magmaet øges, forsvinder boblerne og der dannes aplit. Hvis trykket igen mindskes, kommer boblerne igen og der dannes pegmatit.

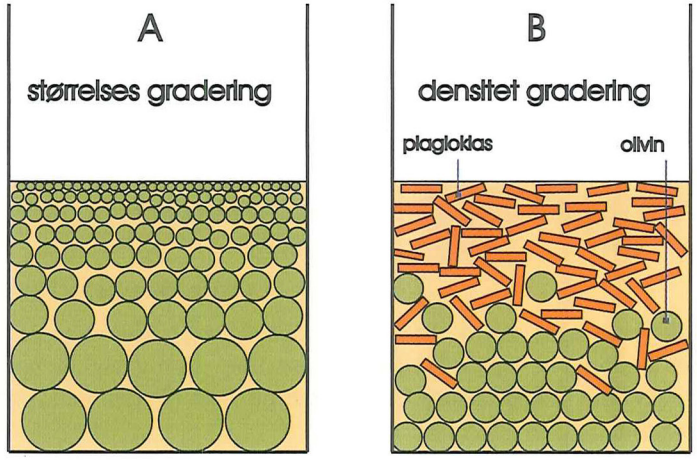
Grænsen mellem aplit og pegmatit er glat og kurvet, hvor aplit er krystalliseret før pegmatit. På grund af de store pegmatitkrystaller er grænsen derimod savtakket, hvor pegmatit er dannet før aplit (fig.4).



Figur 4. A, Yderst til højre sidesten (grå), og dernæst finkornet kontaktzone dannet ved hurtig afkøling (gul). Den efterfølges af en aplitzone (lys rød) og en pegmatitzone (rød). B, I dette tilfælde dannes der først pegmatit og så aplit. Da pegmatitkrystallerne er store, bliver kontakten mod aplit savtakket, medens aplit/pegmatit kontakten er glat fordi apliten er finkornet.

Mineraler i pegmatitgange vokser for det meste fra gangens væg og indefter mod midten (fig. 5). Yderst findes der en 1-10 cm bred afkølingszone med 1-10 mm store krystaller. Krystallerne er her små, fordi der sker en hurtig afkøling af magmaet mod den koldere sidesten. Længere inde i gangen i en afstand af ca. 0.5-1 m bliver krystallerne store, op til en meter i diameter, fordi afkølingen her er langsom. At krystallisationen foregår fra siden og ind mod midten fremgår af, at krystaller vokser vinkelret fra siden og ind mod midten. Dette ses særlig tydeligt for mineralet biotit, der danner op til 40 cm lange krystaller, der er orienteret vinkelret på pegmatitgangens kontakt til sidestenen (fig. 6). Disse krystaller har et perfekt omrids, hvilket må betyde, at de er dannet først og derefter er blevet omgivet af andre mineralkorn.

plagioklas ved bunden må også gælde - blot med omvendt fortegn - for de 'tunge' mineraler, olivin og pyroxen, ved taget.



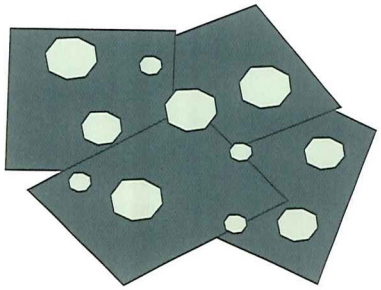
Figur 7. Graderingstyper i lagdelte intrusioner.

Graderet lagdeling

Lag af gabbro er sædvanligvis graderet på en måde, der umiddelbart minder om visse typer sedimenter. Gradering dækker f.eks. at laget er lysere i toppen end i bunden eller at kornene er større i bunden end i toppen. I Stokes lov er den hastighed, hvormed partiklerne bundfælder, proportional med densitetsforskellen mellem mineralet og den fluide fase, og proportional med kvadratet af deres radier. Hvis krystallerne i et magma bundfælder ifølge Stokes lov, vil graderingen snarere være kontrolleret af størrelsen end af krystallernes densitet. Størrelsesgradering (fig. 7) er ualmindelig i lagdelte gabbroiske bjergarter; den såkaldte densitetsgradering er derimod almindelig (fig. 5B og 7). Som vi vil se senere, kan andre faktorer end densitet også have indflydelse på denne gradering.

Bjergartstexturer

Krystaller, der bundfælder i et magma, vil danne et sammenhængende netværk svarende til, hvad man ser i sedimentære bjergarter og bjergarter dannet ved laboratorieeksperimenter, hvor der altid er berøringsflader krystallerne imellem. Detaljerede mikroskopistudier af lagdelte gabbroer viser, at mange krystaller ikke indgår i et sådant netværk, men i stedet er indesluttet i en anden og større 'værts-krystal' (fig. 8). Det indesluttede mineral og



værtsmineralet må være krystalliseret på samme tid. Texturen (relationen mellem de forskellige mineraler) er derfor betinget af de to mineralers vækstmåde. De indesluttede krystaller er vokset udfra mange, adskilte krystalkim, hvorimod værtsmineralet er vokset udfra et enkelt eller få krystalkim. Under væksten har værtsmineralet så omsluttet de indesluttede krystaller.

Figur 8. Olivin indesluttet i pyroxen

Der er flere aspekter ved de lagdelte gabbroiske bjergarter som er svære, hvis ikke umulige, at forklare ved 'crystal settling'. Den generelle opfattelse i dag er, at man må finde andre forklaringer på disse bjergarters krystallisationsprocesser.

Et nyttigt diagram

Et alternativ, der har vundet den største anerkendelse, kan belyses ved at betragte et fasediagram. Et fasediagram viser forholdet mellem såkaldte faser, f.eks. ved hvilke temperaturer et eller flere mineraler krystalliserer fra en smelte, eller hvordan et mineral smelter.

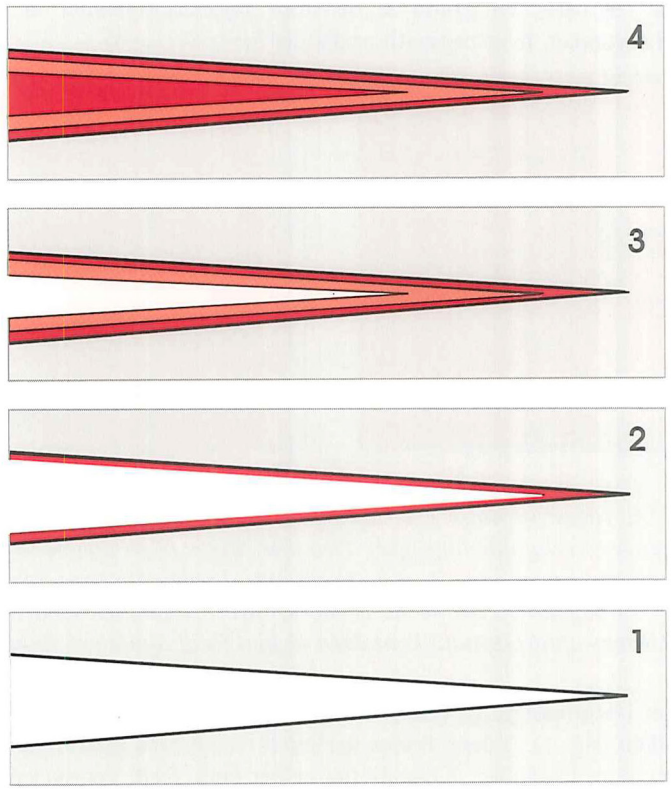
Figur 9A viser et simplificeret system med to mineralfaser, der er almindelige i lagdelte gabbroer, nemlig olivin og plagioklas. I diagrammet vil basaltisk magma være placeret til højre for det eutektiske punkt, der er den laveste temperatur hvor der kan være smelte. Dette betyder, at olivin vil være den første fase, der krystalliserer, når liquidus-fladen nås.

Det skal her bemærkes at naturlige basaltiske magmaer normalt også krystalliserer andre mineraler end olivin og plagioklas. Liquidus-fladen er den linie i diagrammet, der illustrerer overgangen fra smelte + krystaller til ren smelte. På tilsvarende vis angiver liquidusfladen, ved hvilke temperaturer der begynder at blive dannet krystaller i en smelte, når smelten afkøles og temperaturen falder.

Ved yderligere afkøling fra B til C vil olivin fortsætte med at krystallisere, mens magmaet beriges i plagioklaskomponenter indtil sammensætningen af magmaet når det eutektiske punkt, C. Da det kun er olivin, der er krystalliseret, vil den bjergart, der er dannet fra B til C, være en ren olivinbjergart, en dunit (fig. 9B).

diffusionshastighed i et magma med gasbobler, der resulterer i dannelsen af store krystaller.

Nogle pegmatiter indeholder vekslende lag af pegmatit og aplit (fig. 3). Aplit er en finkornet udgave af pegmatit med korn, der er omkring 1 mm store. Apliterne har den samme - granitiske - sammensætning som pegmatiten.



Figur 3. Udvikling af sammensat gang (sidesten grå). 1) Opsprækket sidesten. 2) Dannelse af pegmatit (rød). 3) Trykket øges, og der dannes aplit (lys rød). 4) Trykkes sænkes, og der dannes igen pegmatit.

Umiddelbart kunne man tro, at apliten er intruderet i pegmatiten, men det er ikke tilfældet. Ændringen fra pegmatit til aplit og omvendt skyldes lokale ændringer i krystallisationsforholdene. Det er trykket i magmaet, der be-

Foruden en stor kornstørrelse er pegmatiter også ofte karakteristiske ved et stort indhold af sjældne mineraler, som f.eks. det radioaktive mineral allanit, smykkemineralerne beryl og turmalin samt glimmermineralet lepidolit, der indeholder grundstoffet lithium.

En forklaring på pegmatitdannelse skal kunne redegøre for både den store kornstørrelse og pegmatiternes indhold af sjældne mineraler. Det viser sig, at begge disse forhold kan relateres til tilstedeværelsen af et magma af f.eks. granitisk sammensætning med et højt indhold af en gas, der hovedsagligt består af vand.

Et granitisk magma indeholder normalt en lille smule vand, omkring 1%. De mineraler, der dannes (udkrystalliserer) når granitmagmaet størkner, indeholder mindre vand end magmaet. Derfor opkoncentreres der vandholdigt gas i magmaet, hvorved granitmagmaet vil kunne blive vandmættet. Når et magma bliver vandmættet sker der to ting: Dels stiger trykket, og dels dannes der bobler. Ligeledes vil de grundstoffer, der ikke indgår i de først udkrystalliserede mineraler, koncentreres i magmaet. Det gælder f.eks. Be, Li, U, Th, og Pb, og det er disse grundstoffer, der senere danner de sjældne mineraler i pegmatiterne.

I løbet af granitmagmaets krystallisation vil der kunne dannes pegmatitgange over granitintrusionen. Dannelsen af disse gange skyldes, at jordskorpen rundt om graniten deformeres, hvorved der opstår sprækker i bjergarterne, der derefter intruderes af pegmatit. En anden årsag til gangdannelsen kan være, at gastrykket i granitmagmaet bliver så stort, at gassen forårsager bruddannelse i de omgivende bjergarter. Hvis der dannes sprækker, vil det gasholdige granitmagma intrudere de bjergarter, der befinder sig over granitmagmaet og danne pegmatitgange. Derved bliver trykket i magmaet mindre, og der vil derfor kunne dannes bobler (hvis de ikke allerede findes). Det er det samme, der sker, når man åbner en sodavand. Når trykket bliver mindre, kan der opløses mindre kuldioxyd i vandet, og derfor udskilles kuldioxyd som bobler. Tilsvarende dannes der gasbobler i et granitmagma, der stiger op, fordi trykket i magmaet bliver mindre. Det er denne dannelse af gasbobler, der er ansvarlig for de store krystaller i pegmatiter.

'Diffusionshastigheden', der er et udtryk for den mængde ioner, der bevæger sig gennem 1cm^2 per sekund, er 1000 gange større i en vandholdig gas end i silikatmineraler. Dette betyder, at grundstofferne i et magma med bobler kan bevæge sig (diffundere) meget hurtigere, end hvis der ikke var bobler. Betingelsen for, at der kan dannes store krystaller, er at der sker en hurtig transport af grundstoffer til den voksende krystal. Det er således den høje

Når magmaet når det eutektiske punkt, vil olivin krystallisere sammen med plagioklas i et såkaldt eutektisk forhold ved en konstant temperatur, indtil magmaet er totalt størknet. Den bjergart, der er dannet ved C (i et eutektisk forhold), vil bestå af ca. 50% olivin og 50% plagioklas og kan klassificeres som en troktolit (et medlem af gabbro-familien, se side 81). Lagene i lagdelte gabbroer veksler typisk mellem olivinrige og plagioklasrige lag. Individuelle lag kan bestå af et enkelt mineral - være monomineralske - og bestå af ca. 100% olivin (dunit) eller 100% plagioklas (anorthosit) (fig. 5A), men lagene har sædvanligvis gradvise overgange (fig. 5B). Krystallisation i forhold til fasediagrammet kan ikke forklare denne type lagdeling.

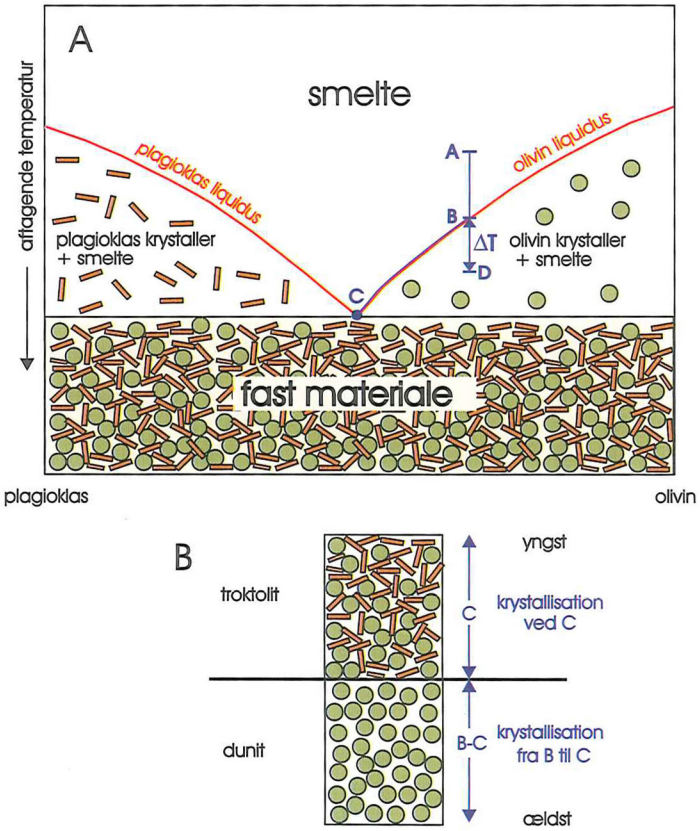


Fig 9A. Eutektisk fasediagram for ligevægtskrystallisation af plagioklas og olivin (se tekst). B: krystallisation ifølge diagrammet.

Det eutektiske fasediagram kan dog forklare dannelsen af lagdeling under forudsætning af en vis mængde underafkøling, d.v.s at temperaturen når ned under den temperatur, hvor krystaldannelse normalt skulle ske, før krystallerne dannes.

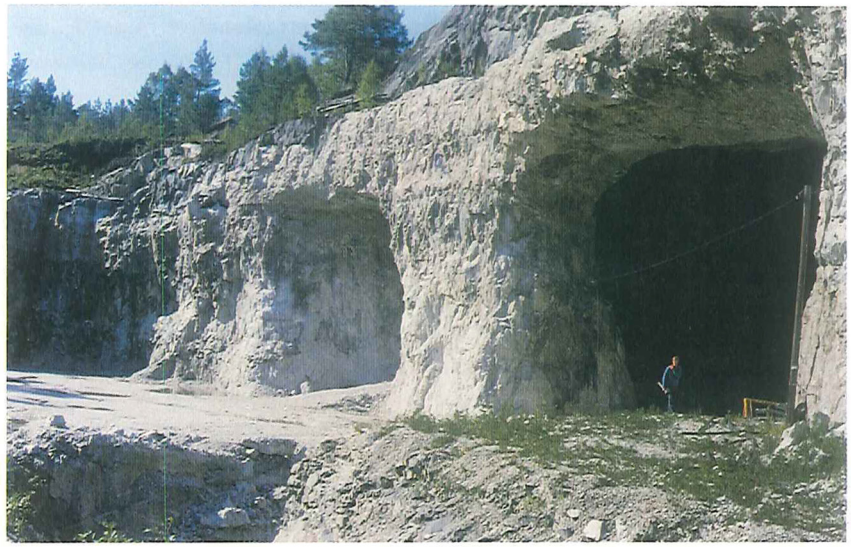
En smelte af sammensætning A ved temperatur D i figur 9A vil være underafkølet med en faktor T- uden at der dannes krystaller - og vil blive overmættet med olivinkomponenten. Eksperimenter viser, at silikatsmelter nødvendigvis underafkøles til en vis grad, for at der kan ske en nukleation (dannelse af kim).

I et fasediagram er der en nukleationskurve for hvert mineral ved en temperatur under dets liquidus-kurve (fig. 10A). Magma med en eutektisk sammensætning (C) vil danne olivin, når smelten skærer nukleationskurven ved X. Olivinkrystaller begynder at vokse, og magmaet ved bunden af kammeret forarmes på olivinkomponenterne. Magmasammensætningen i dette område vil derfor bevæge sig væk fra olivin (fra X mod Y) ved konstant temperatur og nærme sig dannelseskurven for plagioklas. Når sammensætningen af magmaet når Y, vil plagioklas dannes og vokse. Dette vil føre den lokale magmasammensætning tilbage mod X. Gentagelse af denne proces vil give en sekvens af bjergartslag, der skiftevis er rigt på olivin h.h.v. plagioklas (fig. 11A).

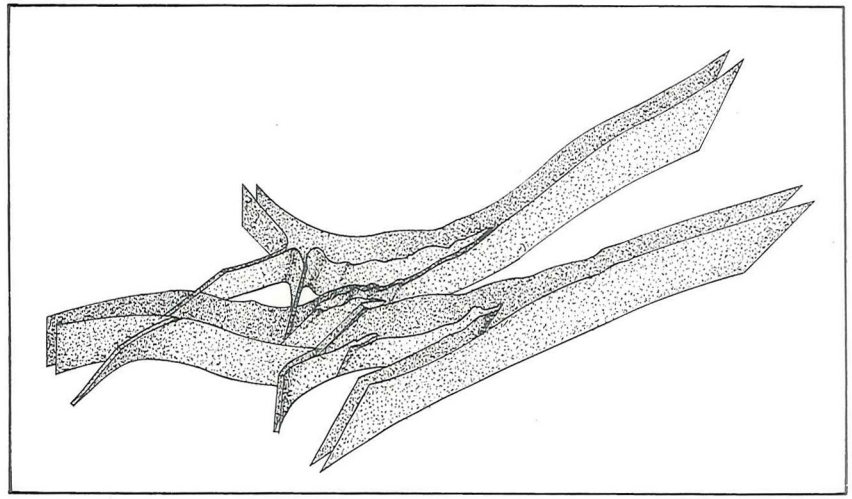
'In situ' krystallisation

Denne proces, der fører til dannelsen af lagdelte bjergarter, kaldes 'in situ' krystallisation. Mineralerne dannes og vokser på det sted, hvor de findes nu (det være sig på bunden, ved væggene eller ved taget) og er ikke blevet transporteret til stedet. Mineraler ved taget med meget høj densitet, samt mineraler ved gulvet med meget lav densitet, kan løsrives og synke eller flyde, men deres densitet og størrelse er generelt ikke kontrollerende faktorer for 'in situ' krystallisation. Gradering er et resultat af overlappende nukleation, som det fremgår af figur 10B.

Silikatmineraler med en relativt simpel struktur som f.eks. olivin dannes lettere end mineraler med en mere kompleks struktur, som f.eks. plagioklas. Dette betyder, at så snart magmasammensætningen når dannelseskurven for olivin, vil der dannes mange olivinkim, så der opstår en brat overgang fra et plagioklasrigt lag til et olivinrigt lag (fig. 10B). Omvendt vil overgangen ved mødet med nukleationskurven for plagioklas være gradvis, da plagioklas har sværere ved at danne krystalkim end olivin. Den resulterende gradering med en olivinrig bund og et stigende plagioklasindhold opefter er således forklaret ved deres forskelle i evne til at danne krystalkim.



Figur 1.Den store vandretliggende pegmatit ved Li i Iveland-Evje området, S. Norge. Væggens højde er ca 20 meter.



Figur 2.Pegmatitgange fra Moss-området i Sydøstnorge. De tykkeste gange er ca 1 m brede.

Pegmatiter

Sven Maaløe

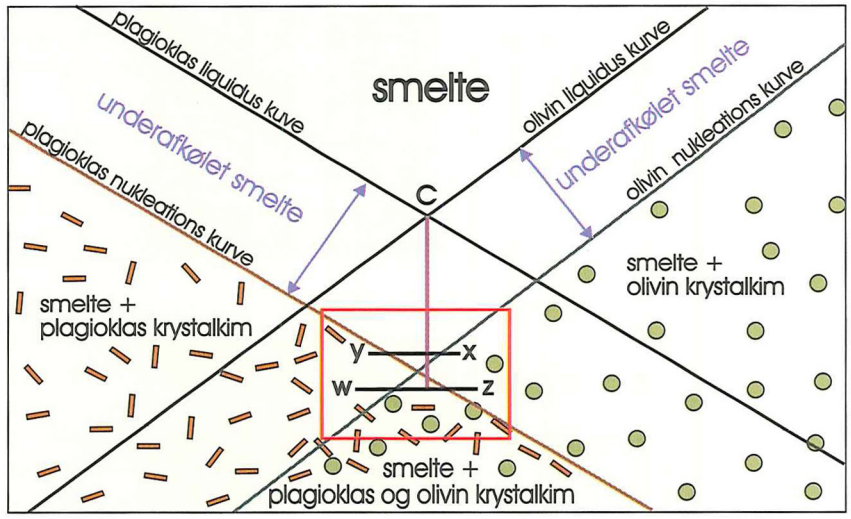
I de fleste magmatiske og metamorfe bjergarter fra Jordens skorpe har mineralkornene den samme størrelse, mellem 1 og 10 mm. Det samme gælder for mineraler fra bjergarter i Jordens kappe (lherzolit).

Umiddelbart er det forbavsende, at disse forskellige bjergarter har samme kornstørrelse. Man kunne tro, at bjergarter, der har været igennem afkøling i lang tid, ville have en større kornstørrelse end bjergarter, der er afkølet gennem kortere tid. Lherzoliten i kappen har haft temperaturer på 1000-1400°C gennem en eller to milliarder år, men alligevel er dens gennemsnitlige kornstørrelse mindre end 5 mm.

Forklaringen på den ensartede kornstørrelse er, at kornenes størrelse bestemmes af forholdet mellem nukleationshastigheden, d.v.s. den hastighed, hvormed der dannes krystalkim, og vækshastigheden. Jo større nukleationshastigheden er i forhold til vækshastigheden, jo mindre bliver kornene. Omvendt, jo mindre nukleationshastigheden er i forhold til vækshastigheden, jo større bliver bjergartens korn. Da bjergarter hovedsageligt består af silikatmineraler, der på mange måder har ensartede egenskaber, bliver kornstørrelsen også ensartet. Der er dog en undtagelse, nemlig bjergarten pegmatit.

Pegmatiter har oftest en granitisk sammensætning og består mest af mikroklin (alkali feldspat), plagioklas og kvarts, samt en række sjældne mineraler (fig. 1). Pegmatiter med en granitisk sammensætning findes i tilknytning til granitintrusioner og er dannet ved indtrængen af en smeltemasse (magma) med granitisk sammensætning i revner og sprækker over granitlegemerne (fig. 2). Når et magma strømmer ind i en sprække, siges magmaet at intrudere, og det størknede magma danner en gang. Pegmatitgange findes f.eks. på Bornholm, hvor bl.a. den øvre del af Rønnegraniten er intruderet af pegmatit.

Generelt varierer kornstørrelsen i pegmatiter mellem 5 cm og 1 m, men nogle pegmatiter indeholder krystaller på mange meters længde. En kugleformet (sfærisk) krystal med en diameter på 4 mm - f.eks. i en granit - har et rumfang på 0,034 cm^3. En tilsvarende krystal i en pegmatit med en diameter på 1 m har et rumfang på 534 cm^3 og er dermed 15400 gange større end en typisk krystal i granit.



Figur 10 A. Krystallisation i et overmættet og underafkølet eutektisk system af olivin og plagioklas (se tekst).

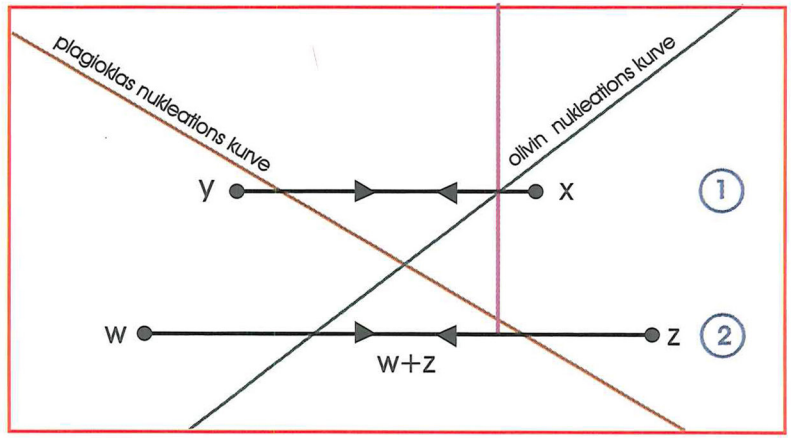
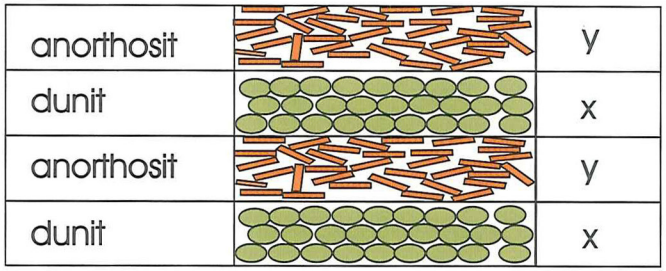


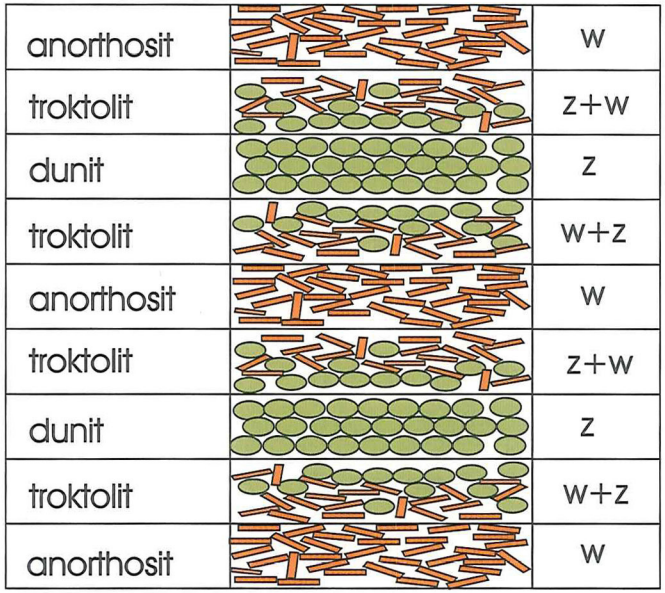
Fig 10 B. Forstørret udsnit markeret på fig.10 A.

Graderingen er også et udtryk for de to mineralers relative densiteter, men densiteten er ikke en kontrollerende faktor i forbindelse med dannelsen af graderingen.

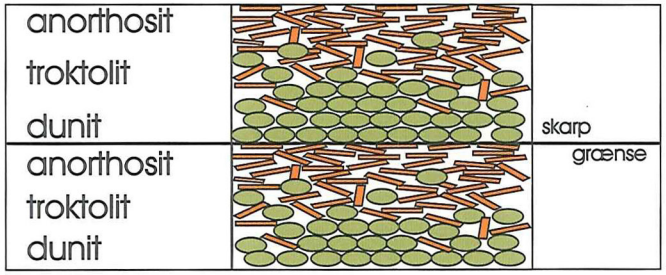
A



B



C



Figur 11 A. Krystallisation 1 i fig. 10 B (lille grad af underafkøling) vil give skiftende olivinrige og plagioklasrige lag. Såfremt der ikke er nogen overlap i nukleation af de to mineraler vil lagene bestå skiftesvis af ren olivin (dunit) og ren plagioklas (anorthosit). Lagdelingen i fig.5A kunne være dannet på denne måde.

Figur 11B. Krystallisation 2 i fig. 10 B (større grad af underafkøling) vil give graderede lag. Hvis de mineraler har samme evne til nukleere vil lagdelingen være symmetrisk.

Figur 11C. Asymmetrisk lagdeling dannes, hvis et af mineralerne har lettere ved at nukleere (olivin) end det andet (plagioklas). Umiddelbart ser det ud til at lagdelingen er styret af mineralernes indbyrdes densitetsforhold, men i virkeligheden er det deres indbyrdes nukleationsforhold der er den styrende faktor. Lagdelingen i fig.5B kunne være dannet på denne måde.

KLASSIFIKATION AF GABBROIDE BJERGARTER

GABBRO: bjergart bestående af plagioklas + klinopyroxen

TROKTOLIT: bjergart bestående af plagioklas + olivin

NORIT: bjergart bestående af plagioklas + orthopyroxen

GABBRO FAMILIEN

GABBRONORIT: bjergart bestående af plagioklas + klinopyroxen + orthopyroxen

OLIVIN GABBRO: bjergart bestående af plagioklas + klinopyroxen + olivin

Andre relaterede bjergarter
ANORTHOSIT: bjergart bestående af plagioklas + få/ingen mørke mineraler

DUNIT: bjergart domineret af olivin

Mørke mineraler omfatter her: klinopyroxen, orthopyroxen, olivin

Hvor vokser krystallerne så i et magmakammer ?

Observationer fra lavastrømme viser, at krystaller kan dannes spontant overalt i et magmakammer. Dette er i modsætning til observationer fra lagdelte intrusioner. Her dannes krystallerne hovedsageligt ved bunden og vokser opefter, men i en vis udstrækning også fra tag og vægge. Den tilsyneladende lighed mellem lagdelingen i gabbroiske bjergarter og lagdelingen i sedimenter skyldes altså ikke de samme dannelsesmekanismer.