

# CONODONTER

## -geologiske termometre

Svend Stouge og Jan Audun Rasmussen

I et tidligere nummer af VARV beskrev vi, hvad conodonter er, og omtalte de seneste teorier vedrørende deres slægtskabsmæssige tilhørsforhold (VARV 1992,4). Kort fortalt er conodonter fosfatiske, tandlignende mikrofossiler, som er vidt udbredte i marine sedimenter fra øvre kambrisk tid (520 mill. år) og frem til slutningen af Trias (208 mill. år). De fleste forskere er i dag enige om, at de udgjorde en slags tænder i munden hos forfædrene til vore dages slimål, der er primitive, kæbeløse fisk. Conodonter er værdifulde til biostratigrafiske dateringer, og en opdeling og sammenligning af lagsøjlerne i forskellige sedimentære bassiner er således mulig, endog med stor nøjagtighed.

Conodonter er også værdifulde til bestemmelse af palæotemperaturer og anvendes i den forbindelse indenfor lavmetamorfosestudier og olieeftersøgning. I denne artikel vil vi redegøre for, hvordan det er muligt ud fra conodonternes farve at sige noget om, hvilke temperaturer conodonterne har været udsat for.

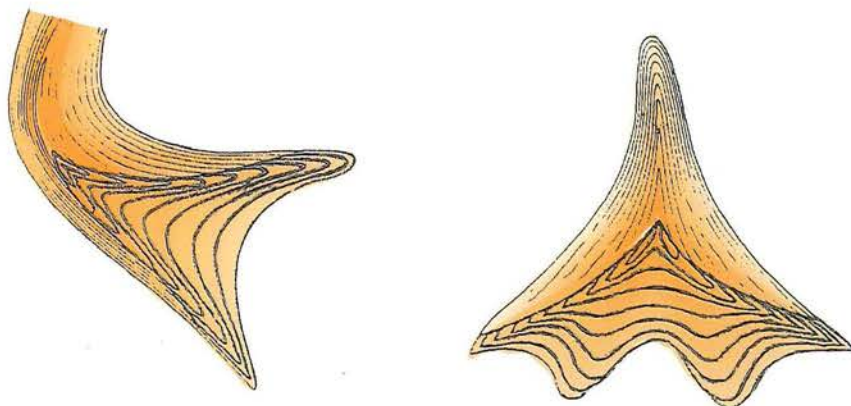


*Figur 1: Conodonter med CAI-værdier på ca 1.5 og 5.0 (henholdsvis venstre og højre figur). Conodonterne er ca. 0.7 og 1 mm store.*

### Conodontfarver og temperatur

Det har længe været kendt, at conodonter kan have forskellig farve (fig. 1), men systematiske undersøgelser af disse farveændringer blev først offentliggjort i 1977. Gennem eksperimenter suppleret med feltstudier kunne conodontfarver omsættes til et farveindeks, der betegnes Colour Alteration Index (CAI). CAI bruges i dag til modenhedsbestemmelse af varmepåvirkede sedimenters.

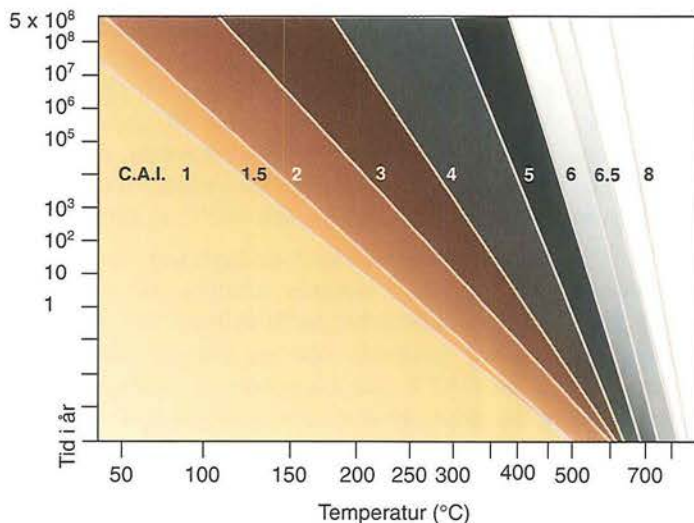
Conodonterne ændrer farve med stigende temperatur, fordi små mængder af organisk materiale er bevaret indeni conodonterne. Det organiske materiale forekommer som tynde lameller imellem tykkere lameller af apatit (flourapatit eller frankolit) (fig. 2). Ved lave temperaturer skyldes farveændringerne langsom forkulning (indkulning) af det organiske materiale, mens selve mineralfasen først begynder at ændre sig (rekrystallisere) ved højere temperaturer.



*Figur 2. Tværsnit af conodonter med lamellar opbygning. Det organiske materiale der bliver farvet, findes langs lamellerne og indeni conodonterne.*

Det har vist sig, at conodonternes farveændring afhænger af både tid og temperatur (fig. 3). Ved brug af et såkaldt Arrhenius-diagram er det muligt at sammenligne CAI-værdierne med temperaturintervaller (fig. 3, Tabel 1). Når den maksimale temperatur er nået, og sedimenterne og dermed også conodonterne bliver udsat for denne temperatur i nogen tid - i størrelsesordenen millioner af år - vil den opnåede farve ikke længere ændre sig, uanset hvor lang tid der går. Farven er derfor et udtryk for den højeste temperatur, som sedimenterne og conodonterne har været opvarmet til. Farveændringen

er en fremadskridende og irreversibel proces (dvs. den kan ikke vende tilbage til udgangspunktet), som sker indeni conodonterne.



Figur 3. Arrhenius diagram. Ved hjælp af diagrammet omsættes CAI-værdier til temperaturintervaller.

Temperatur °C	CAI	Organisk facies	Olie og gas
50	1	Umoden	Tidlig gas og olie
100	1.5	Moden	Tung og let olie og gas
	2		
150	3	Overmoden	Gas

Tabel 1. CAI-værdier i relation til oliedannelse.

## CAI-farver og temperatur

Conodonerne ændrer sig fra lyse mod mørke farver (fig. 1) med stigende temperaturer indtil omkring 300°C (Tabel 1). Conodoner med CAI 1 er bleggule og gennemsigtige. Dette svarer til, at den maksimale temperatur ikke har overstegt 50-80°C; CAI 1,5 er harpiksfarvet og angiver en temperatur på 50-90°C; CAI 2 er brun og svarer til temperaturer, som ligger mellem 60° og 140°C; CAI 3 er mørkebrun og conodonerne har da været opvarmet til temperaturer mellem 110-200°C; CAI 4 er sortbrun og ligger indenfor temperaturintervallet 190-300°C, medens conodoner med CAI 5 er sorte og har været udsat for opvarmning til mellem 300°C og 400°C.

Værdier mellem CAI 1 og CAI 5 repræsenterer en langvarig opvarmning, som kan være relateret til indsynkning af bassiner samtidig med en opfyldning. CAI-værdien vil således også kunne bruges til at bestemme, hvor meget sediment der maksimalt har overlejet den pågældende prøve. Ved højere CAI-værdier, CAI 6 til CAI 8, har conodonerne været udsat for endnu højere temperaturer, og sedimenterne, som conodonerne er indlejrede i, har enten været udsat for diagenese (dvs. mindre omdannelse ved lave temperaturer) eller metamorfose (dvs. markant omdannelse ved højere temperaturer eller tryk).

Kendskabet til farveændringer i conodonerne ved de højere temperaturintervaller er opnået både gennem laboratorieeksperimenter og feltobservationer af metamorfoserede og hydrotermalt omdannede bjergarter. CAI-værdier højere end CAI 5 viser således korte opvarmingsbegivenheder. Ved disse højere CAI-værdier skifter conodonerne farve fra sorte (CAI 5) til gråsorte (CAI 6), lysegrå (CAI 6p), mathvide eller mælkehvide (CAI 7) og tilsidst bliver de farveløse, klare og gennemskinnelige (CAI 8). De tilsvarende temperaturintervaller starter ved 350°C og forsætter op til CAI 8, som begynder ved 600°C (Tabel 2). Conodonerne bliver gradvist nedbrudt ved temperaturer over 600°C.

## Anvendelse af CAI

En af de vigtigste anvendelser af CAI-værdier er i forbindelse med modenhedsbestemmelser ved olie- og gasefterforskning. Begrebet modenhed bruges til at udtrykke omdannelse af organisk materiale som følge af stigende temperatur og tryk. At sediment er modne antyder, at de er olie-dannende, medens overmodne sediment er gasgivende eller har afgivet gas.

Temperatur °C	CAI	Metamorf facies	Illite index
50	1	Zeolitfacies	Diagenesezone
	1.5		
100	2		
	3		
200	4	Prehnit — Actinolitfacies	Anchizone
300			
400	6	Grønskiferfacies	Epizone
	6.5		
500	7		
600	8		

Tabel 2. Korrelation mellem CAI, metamorfe facies og lerkrySTALLINITET.

CAI-værdierne anvendes også indenfor mineindustrien. Således bliver CAI ofte brugt ved eftersøgning af en særlig type zink-bly mineraliseringer, der forekommer i kalksten aflejret i stabile sedimentære bassiner inde på kontinenterne.

Bestemmelse af CAI sker ved at identificere conodotelementernes farve i en prøve. De monteres mod en neutral grå baggrund med en standardopsætning af lys. Conodonerne sammenlignes med et standard farvesæt bestående af conodoner med forskellige forudbestemte CAI-værdier.

### **CAI-bestemmelse og dens anvendelse indenfor organisk metamorfose**

Studier over temperaturfordelingen eller den termale modenhed af nedre palæozoiske sedimentære bassiner baseret på CAI-værdier er allerede foretaget en række steder på Jorden. Udgangspunktet for disse undersøgelser er en regional kortlægning, hvor der fremstilles et kort, der viser CAI-værdiernes fordeling. Ud fra kortlægningen kan det generelle billede af modenhedsfordelingen i et område aflæses.

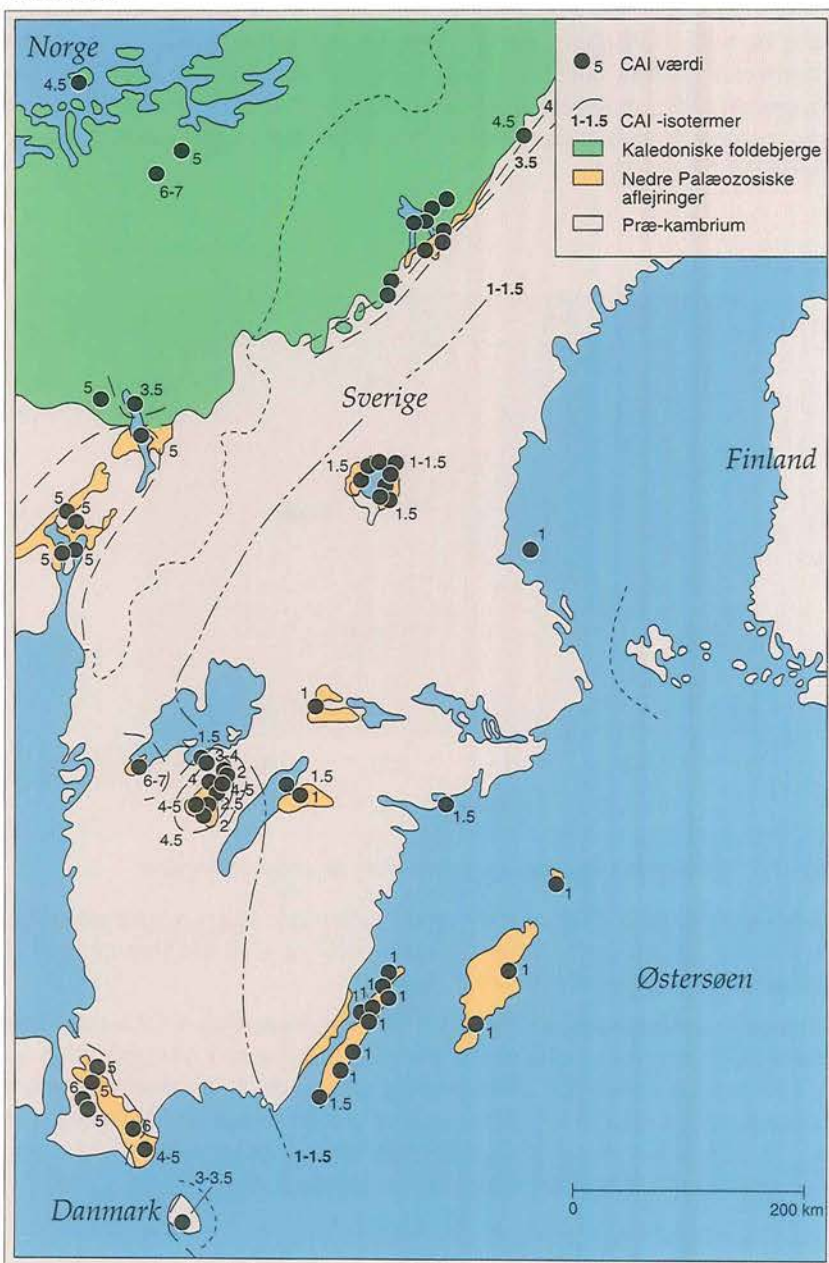
Analyse af CAI-værdier kan anvendes til at rekonstruere den temperaturmæssige udvikling af sedimentbassiner og kan således bruges til at identificere oliedannende og olieholdige lag. CAI-værdierne 1,5-2 angiver at sedimenterne er modne, og værdierne afspejler således olievinduet, dvs. det temperaturområde, hvor oliedannelse i undergrunden sker (Tabel 1).

Den nyeste sammenstilling af conodontfarve-data fra den sydlige del af det skandinaviske område ses i Figur 4. CAI-fordelingen i den sydvestlige del af Skandinavien og i Østersøområdet viser lave værdier mod nordøst og stigende værdier i nordvestlig, vestlig og sydvestlig retning. For eksempel findes lave værdier, dvs CAI 1, på nordlige Öland, mens de er 3-3,5 på Bornholm. Dette må betyde, at oliedannelse har fundet sted mellem Öland og Bornholm. Der er dog endnu ikke fundet olie i området.

### **Unormale CAI-værdier i det Skandinaviske område og deres tolkning**

Medens et tværsnit fra det nordlige Öland til Bornholm viser et billede med generelt stigende CAI-værdier, ses det, at CAI-værdierne lokalt - som f.eks. i Oslo-området - er usædvanligt høje. Oslo-områdets CAI-værdier ligger fra CAI 4,5 til CAI 5-6 og er målt på ordoviciske og silure conodoner (ca. 510-400 mill. år gamle). Det betyder, at sedimenterne har været udsat for temperaturer op til mindst 250°C, og i enkelte tilfælde har været opvarmet til over 400°C (Tabel 1). Forklaringen på de høje værdier er, at Oslo-området var udsat for kraftig vulkansk aktivitet i Perm-tiden for 290 mill. år siden. I dag finder man således magmatiske bjergarter - både intrusive og vulkanske - i området.

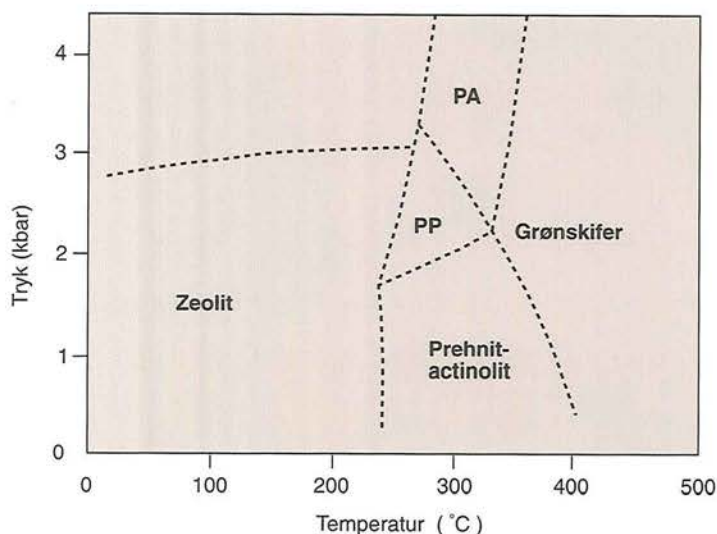
Lignende eksempler finder man i Sverige, hvor Västergötland og Skåne har været udsat for vulkansk aktivitet siden aflejringen af de nedre palæozoiske sedimenter.



Figur 4. Fordeling af CAI-værdier i Skandinavien.

### Sammenhæng mellem CAI, diagenese og lavmetamorfe facies

Studier af lavgradsmetamorfose beskæftiger sig med mineralogiske og kemiske ændringer i bjergarter, der har været udsat for relativt lave temperaturer og tryk. Underopdeling af lavgradsmetamorfose baseres på tilstedeværelsen af kritiske mineraler, som definerer de regionale zeolit, phrenit-pumpellyit (PP), prehnit-actinolit og pumpellyit-actinolit facies (PA) i et tryk- og temperaturdiagram. Den efterfølgende højere metamorfe facies er grønskifer facies (fig.5).



Figur 5. Lavmetamorfe facies og deres tryk- og temperaturfelter.

Korrelation mellem CAI og tilsvarende metamorfe temperaturer er mulig, og dermed udvides anvendelsen af conodonte og CAI-indekset til også at omfatte studier af lavmetamorfe bjergarter.

Regionalt metamorfoserede bjergarter viser, at forøgelsen i CAI-værdierne svarende til conodontelementernes farveændring fra sort over grå til hvid (CAI 5-7) svarer til chlorit- til biotitgrads metamorfose. Områder med zeolit facies svarer til CAI 1-3, prehnit-actinolit facies svarer til CAI-værdierne 4-5. Områder med chloritholdige bjergarter har givet conodonte med værdier omkring 5-5,5, hvilket svarer til temperaturer mellem 300<sup>o</sup> og 400<sup>o</sup>C.



Ved CAI-værdier over 5 begynder conodonte at rekrystallisere, og størrelsen af de enkelte apatitkrystaller kan så bruges som en direkte temperaturindikator i grønskifer facies. CAI med højere værdier end 5 svarer til pumpeyllit-actinolit og grønskifer metamorfe facies (Tabel 2).

Lerminerale omdannes også med stigende temperatur og omdannelsen (rekrystallisationen) af lermineralet illit er et udtryk for graden af omdannelse af de finkornede sedimente. Dette danner basis for klassifikation af tre metamorfe zoner, som betegnes diagenesezonen, anchizonen og epizonen (fra laveste til højeste temperatur). Korrelation mellem graden af illit-rekrystallisation og CAI er tydelig. CAI-værdierne mellem 1-3,5 svarer til diagenesezonen, CAI 4 og 4,5 ligger i anchizonen og værdierne fra CAI 5 og derover strækker sig ind i epizonen (Tabel 2).

Sammenligning af CAI-værdier og lavmetamorfe facies og zoner er stadig på begyndelsesstadiet. Først i de senere år er systematisk prøveindsamling af lavmetamorfe bjergarter til bestemmelse af CAI påbegyndt og resultaterne er endnu ikke offentliggjort.

Alt i alt - den egenskab, at conodonte giver informationer om den termale udvikling, først ved ændringer i det organiske materiale (op til 400°C og CAI 1-5) og senere ved en apatitrekrystallisation (op til 600°C), gør dem unikke til brug ved palæo-temperaturbestemmelser i sedimentære bassiner.

