

# Dictaat TA 1900 Mineralen en gesteenten

## Inhoud

1.	Algemene informatie.....	2
1.1.	ta1900 Mineralen en Gesteenten.....	2
1.2.	Tentamenstof en voorbeeldtentamens.....	3
2.	Inleiding.....	11
2.1.	Kristallen, mineralen en gesteenten.....	11
2.2.	Enkele chemische begrippen.....	11
2.3.	De kristallijne structuur.....	14
3.	Kristallografie.....	15
3.1.	Inleiding.....	15
3.2.	Symmetrie-elementen.....	16
3.3.	Kristalklassen (puntgroepen) en kristalstelsels.....	17
3.4.	Kristallografische assen.....	18
3.5.	Miller indices.....	21
3.6.	De stereografische projectie.....	22
3.7.	De habitus van een mineraal, tweelingsvormen.....	24
3.8.	Het practicum kristallografie (onderdeel van TA 1900 - deel 3).....	24
4.	Mineralogie.....	32
4.1.	Systematiek.....	32
4.2.	Kristalstructuren.....	32
4.3.	Macroscopisch onderzoek van mineralen.....	35
4.4.	Practicum mineralogie (inclusief mineraalbeschrijvingen).....	39
5.	Optische mineralogie.....	57
5.1.	Inleiding.....	57
5.2.	De brekingsindex.....	59
5.3.	Dubbelbreking.....	60
5.4.	De indicatrix.....	61
5.5.	Gangverschil en interferentiekleur.....	62
5.6.	Het interferentiefiguur ('assenbeeld').....	64
5.7.	Overige optische eigenschappen.....	68
5.8.	Practicum optische mineralogie (ta1900 – deel 4).....	69
6.	Gesteenten.....	83
6.1.	Inleiding.....	83
6.2.	De drie hoofdgroepen gesteenten.....	83
6.3.	Magmatische gesteenten.....	84
6.4.	Sedimentaire gesteenten.....	93
6.5.	Metamorfe gesteenten.....	103
6.6.	Het practicum.....	111
7.	Bijlagen.....	114
1.	Stroomschema voor gesteenten.....	114
2.	fasendiagram plagioklaas.....	115
3.	Procedure voor de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas I.....	116
4.	Procedure voor de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas II.....	117
5.	Hulpfiguren voor het schatten van de mineraalpercentages in een slijpplaatje.....	118
6.	Grafiek met de brekingsindex n uitgezet tegen de dubbelbreking dB.....	119
7.	Kleurenkaart van Michel Lévy.....	120

# 1. Algemene informatie

## 1.1. ta1900 Mineralen en Gesteenten

Het vak Mineralen en Gesteenten is opgebouwd uit twee theoretische delen en drie practicumdelen. Elk deel wordt apart schriftelijk getentamineerd, de verkregen cijfers worden gecombineerd tot een eindcijfer. De indeling is als volgt:

	onderwijs in periode:	tentamen in periode:	herkansing in periode:
Theorie:			
ta1900-deel 1	1	1	2
ta1900-deel 2	2	2	3
Practicum:			
Ta1900-deel 3	1	1	2
Ta1900-deel 4	2	2	3
Ta1900-deel 5	3	3	4

Aan welke eisen moeten de cijfers voldoen:

Deelcijfers: voor alle deelcijfers moet minimaal een 5.0 gehaald worden.  
Deelcijfers worden afgerond op 1 decimaal.

Eindcijfer: Het gemiddelde van de deelcijfers geeft het eindcijfer voor ta1900.

Het eindcijfer wordt afgerond op x.0 of x.5;

Let op: op de eindlijst voor het propaedeuse-examen zijn alleen cijfers gelijk aan, of hoger dan, een 6.0 toegestaan.

Let op: 5.8 en 5.9 worden afgerond op een 6.0, 5.7 wordt afgerond op 5.0

Korte beschrijving van de inhoud (zie voor uitgebreide beschrijving op de ta-sites):

ta1900-deel 1:

Theoretische achtergrond van aspecten van de kristallografie, mineralogie en optische mineralogie

ta1900-deel 2:

De nadruk zal liggen op de globale ontstaanswijzen van gesteenten en de hieraan gerelateerde classificatie van gesteenten.

ta1900-deel 3:

Tijdens dit practicumonderdeel wordt kennis gemaakt met een aantal veel voorkomende mineralen, dit zijn voornamelijk gesteentevormende mineralen, daarnaast komen enkele bekende ertsmineralen ter sprake. Daar de kristalvorm van mineralen een belangrijk determinatiekenmerk is wordt de helft van de tijd besteed aan het bestuderen van kristalvormen.

ta1900-deel4

De optische eigenschappen van mineralen worden uitgelegd aan de hand van gesteentevormende mineralen. Na dit practicumonderdeel wordt de werking van de polarisatiemicroscopie als bekend verondersteld.

ta1900- deel 5:

Dit onderdeel is gericht op de macroscopische en microscopische determinatie van de belangrijkste gesteenten.

De tentamenstof voor alle deeltentamens bevindt zich op pagina 3.

Tentamenvoorbeelden van de diverse onderdelen bevinden zich op pagina 4 t/m 10.

## 1.2. Tentamenstof en voorbeeldtentamens

### Tentamenstof ta1900 - deel 1:

Uit dit dictaat moeten de volgende onderwerpen bestudeerd worden:

- Hoofdstuk 2: inleiding 2.1 t/m 2.3
- Hoofdstuk 3: kristallografie 3.1 t/m 3.8
- Hoofdstuk 4: mineralogie 4.1 t/m 4.3 (4.2: inclusief de chemische formules)
- Hoofdstuk 5: optische mineralogie 5.1 t/m 5.7

Ook kunnen vragen gesteld worden over tijdens het college behandelde stof.

Enkele voorbeeldvragen kun je vinden op pagina 4.

### Tentamenstof ta1900 – deel 2:

Uit dit dictaat moeten de volgende onderwerpen bestudeerd worden:

- Hoofdstuk 4: mineralogie In paragraaf 4.2 worden de silicaten besproken. Voor dit tentamen wordt verwacht dat je weet in welke gesteenten de genoemde mineralen voor kunnen komen. Informatie hierover vind je bij de mineraalbeschrijvingen op blz. 41 t/m 55 en in hoofdstuk 6.
- Hoofdstuk 6: gesteenten 6.1 t/m 6.5

Ook kunnen vragen gesteld worden over tijdens het college behandelde stof.

Enkele voorbeeldvragen kun je vinden op pagina 5.

### Tentamen ta1900 – deel 3

Het tentamen van ta1900-deel 3 bestaat uit een onderdeel kristallografie en een onderdeel mineralogie. De tentamenstof voor deze twee delen staat beschreven in dit dictaat op:

- Pagina 26: onderdeel kristallografie
- Pagina 39: onderdeel mineralogie

Het tentamenformulier kun je vinden op pagina 6

### Tentamen ta1900 – deel 4

De tentamenstof voor dit onderdeel (optische mineralogie) staat beschreven op:

- Pagina 82: oefening 11

Het tentamenformulier kun je vinden op pagina 7

### Tentamen ta1900 – deel 5

Het tentamen van ta1900-deel 5 bestaat uit twee delen: een deel microscopische determinatie van gesteenten en een deel macroscopische determinatie van gesteenten. De tentamenstof voor deze delen staat beschreven op:

- Pagina 113: macroscopische en microscopische determinatie van gesteenten.

Tentamenformulieren voor deze deeltentamens kun je vinden op de pagina's 8 t/m 10.

## Voorbeeldvragen tentamen ta1900-deel 1

1

Wat is een mineraal? Wat is een kristal? Wat is een gesteente?

2

Kennis van scheikundige verbindingen is van belang in de kristallografie en de mineralogie. De chemische bouwstenen en de wijze waarop de bouwstenen met elkaar verbonden zijn bepalen de fysische eigenschappen van mineralen. Welke bindingstypen spelen een rol tijdens de vorming van mineralen?

Wat is een metaalbinding precies? Mineralen waarin een metaalbinding een grote rol speelt hebben doorgaans een zeer specifieke eigenschap, welke?

Welke effecten kunnen de van der Waals binding en de ionbinding hebben op de fysische eigenschappen van mineralen?

3

We kennen een 1-, 2-, 3-, 4- en 6-tallige symmetrie-as. Waarom bestaat er geen 5-tallige symmetrie-as?

Door de symmetrische eigenschappen van kristallen te bestuderen is snel te zien tot welk kristalstelsel de kristallen behoren. Noem de zeven kristalstelsels en geef aan wat de karakteristieke symmetrie per stelsel is.

4

Wat is een Bravais rooster? Hoeveel verschillende Bravais roosters zijn er? Wat zijn de drie grondvormen?

Wat is de relatie tussen Bravais rooster en kristalklasse en kristalstelsel?

5

Geef aan of onderstaande combinaties van Weiß-indices en Miller-indices goed dan wel fout zijn

Weiß	Miller	goed	fout
{222}	{111}	O	O
{123}	{321}	O	O
{215}	{5 10 1}	O	O
{346}	{432}	O	O
{75∞}	{571}	O	O
{165}	{156}	O	O

6

Wat is de isotrope snede van een tetragonaal kristal? Hoe herken je deze?

Wat is de isotrope snede van een kubisch kristal? Hoe herken je deze?

Hoe kun je ontdekken of je te maken hebt met de isotrope snede van een tetragonaal mineraal of met die van een kubisch mineraal? Leg uit hoe je conclusie tot stand komt?

Is het ook mogelijk om met behulp van de polarisatiemicroscopie te ontdekken of je met een tetragonaal of een orthorhombisch mineraal te maken hebt? Zo nee, waarom niet? Zo ja, hoe doe je dat?

Is het ook mogelijk om met behulp van de polarisatiemicroscopie te ontdekken of je met een tetragonaal of een trigonaal mineraal te maken hebt? Zo nee, waarom niet? Zo ja, hoe doe je dat?

7

Wat wordt verstaan onder de brekingsindex van een mineraal?

Heeft elk mineraal één brekingsindex? Zo nee, hoeveel dan wel?, Zo ja, waarom?

Wat wordt verstaan onder de dubbelbreking van een mineraal? Waarvan is de dubbelbreking afhankelijk?

8

Wat wordt verstaan onder het gangverschil van een bepaalde doorsnede van een mineraal? Hoe komt dit gangverschil tot stand? Hoe kun je dit gangverschil waarnemen? Welke zeer belangrijke optische eigenschap van mineralen kun je bepalen als het maximale gangverschil bekend is?

9

Er is een slijpplaatje gemaakt van een calcietskristal, dat hiervoor evenwijdig aan de C-as is doorgesneden. Dit slijpplaatje wordt door de polarisatiemicroscopie bestudeerd. Leg zo uitgebreid mogelijk uit wat er precies met de lichtstralen gebeurt vanaf het moment dat deze het preparaat raken totdat zij de analysator verlaten. Wat gebeurt er precies als het calcietskristal loodrecht op de C-as was doorgesneden?



## Voorbeeldvragen tentamen ta1900-deel 2

1

Een rhyoliet, een arkose, een graniet en een gneis kunnen dezelfde mineralogische samenstelling hebben. Stel dat dit het geval is, welke criteria gebruik je dan om de gesteenten van elkaar te onderscheiden, en hoe bepaal je dan de juiste naam voor de gesteenten?

Noem zoveel mogelijk verschillen tussen een schalie en een leisteen.

Wat is een pegmatiet?

2

Diep in de aardkorst is een magma aanwezig met een diorietsamenstelling. Dit magma gaat op deze diepte stollen. Welk gesteente, of welke gesteenten, verwacht je en waarom?

Na een lange verblijftijd (50.000 jaar) van dit magma in de aardkorst gebeurt er iets waardoor dit magma alsnog gaat stijgen en als lava op het aardoppervlak naar buiten stroomt. De lava gaat stollen. Welk gesteente, of welke gesteenten, verwacht je en waarom?

3

In een warm en droog deel van deze aarde bevindt zich een lagune die een deel van het jaar in verbinding staat met de zee. Een deel van het jaar is deze lagune echter van de open zee afgesloten omdat het water-niveau van de zee dan onder een tussen zee en lagune aanwezige heuvelrug, die uit een permeabele kalksteen bestaat, gezakt is. Leg uit wat er allemaal gebeurt als het water in de lagune geheel verdampt.

4

In een warm en nat deel van deze aarde wordt een graniet blootgesteld aan chemische verwerking. Leg uit welke processen er tijdens aanhoudende verwerking van deze graniet optreden. Welke gesteenten ontstaan en hoe ontstaan deze gesteenten?

5

Noem 5, 8, 10 of 12 organismen met een kalkskelet (figuur dictaat) en maak een tekening van het bijbehorende skelet.

6

Hoe luidt de classificatie van Dunham? Wat is diagenese?

7

Wat is een pyroklastische afzetting? Wat is een fenokrist, een porfieroblast, een pegmatiet, een metamorfe faciës?

8

De meeste gesteenten hebben diverse toepassingsmogelijkheden. Noem voor de hieronder genoemde gesteenten zo veel mogelijk toepassingen.

Zandsteen, bazalt, steenzout, kalksteen, graniet, gneis, hoornrots

9

Wat is het belang van de reeks van Bowen als we praten over:

Magmatische gesteenten

Sedimentaire gesteenten

Metamorfe gesteenten?

Naam:

studienummer:

Nr. collectie:

---

### TENTAMEN ta1900 - 3

Voor dit tentamen krijg je twee collecties uitgereikt:

- een doos met hierin 10 kleine doosjes met in elk doosje een mineraal. De mineralen zijn van 1 tot 10 genummerd (soms staat het nummer in het doosje, soms op het mineraal). Het houten blokje geeft het nummer van je tentamencollectie, dit nummer moet je rechtsboven op dit formulier invullen.
- Een doos met drie kristalmodellen. In de doos staat hetzelfde nummer als op het houten blokje.

De vragen:

1. Geef van elk mineraal de naam en de chemische formule. Gebruik hiervoor onderstaande tabel. Tijdens dit onderdeel mag je gebruik maken van: loep, zoutzuur, streeplaatje, stuiver, glas en kompas.
2. Vul voor elk kristalmodel een formulier in zoals je dat tijdens het practicum geoefend hebt. Tijdens dit onderdeel mag je gebruik maken van de hand-outs die tijdens het tentamen worden uitgedeeld (tabel met overzicht van symmetrie-elementen per kristalklasse/kristalstelsel en de hulpfiguren die je nodig hebt voor de stereografische projecties).

Nr. min.	Naam mineraal	Chemische formule van mineraal
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		

Puntentelling:

Voor het onderdeel mineralen kun je in totaal 60 punten krijgen (per mineraal+formule 6). Voor elk kristalmodel kun je 20 punten krijgen, in totaal ook 60 punten. Voor de twee onderdelen samen kun je 120 punten krijgen. Het door jou behaald aantal punten gedeeld door 12 geeft je cijfer voor ta1900-deel 3.

Naam:

studienummer:

Nr. dd:

**TENTAMEN ta1900 - 4**

Voor dit tentamen krijg je één slijpplaatje uitgereikt waarin drie à vier hoofdmineralen aanwezig zijn. Maak van drie verschillende hoofdmineralen een zo compleet mogelijke beschrijving met behulp van de onderstaande tabellen. Als je vier verschillende mineralen beschrijft wordt het slechtst beschreven mineraal niet meegenomen voor de bepaling van het cijfer. De cijfers tussen haakjes geven het aantal te behalen punten per eigenschap. Dit aantal is afhankelijk van het te beschrijven mineraal.

Tijdens dit tentamen mag gebruik gemaakt worden van de volgende figuren die ter plekke worden uitgedeeld: hulpfiguur voor de bepaling van de relatieve brekingsindex, figuur met de uitdovingshoeken van amfibolen en pyroxenen, hulpfiguren voor de interpretatie van assenbeelden, het n-db diagram, plagioklaasgrafiek (%An - uitdovingshoek lamellen) en de kleurenkaart van Michel Lévy.

<b>Mineraal 1</b>	
Kleur (1) Pleochroïsme (0-1)	
Splijting (1-4) Splijtingshoek (0-2)	
Interferentiekleur (1) Gangverschil (0-2) Dubbelbreking (2)	
Reliëf (1)	
Brekingsindex (1)	
Omzetting/verwerking (0-1)	
Tweelingsvorm (0-2)	
Uitdoving (0-3) Uitdovingshoek (0-2)	
Interferentiefiguur (1-2) Optisch teken (0-2) Assenhoek (0-2)	
Kristalgrootte (2)	
Bijzonderheden (0-3)	
Naam mineraal (3)	

**Tentamen ta 1900-deel 5a:**

**Collectienummer:**

**Microscopische beschrijving van dd nr:**

**door:  
st.nr.:**

Tijdens dit deeltentamen moeten twee dd's beschreven worden. Bij elke dd krijg je tevens het handstuk waarvan de dd is gemaakt. Er mag gebruik gemaakt worden van de volgende figuren die ter plekke worden uitgedeeld: hulpfiguur voor de bepaling van de relatieve brekingsindex, figuur met de uitdovingshoeken van amfibolen en pyroxenen, hulpfiguren voor de interpretatie van assenbeelden, het n-db diagram, de kleurenkaart van Michel Lévy, Streckeisen diagrammen, classificatiediagram zandsteen, tabel met mineralen per metamorfe faciës. Ook de bijlage met mineraalbeschrijvingen wordt uitgedeeld, evenals een flesje zoutzuur.

De vragen:

1. Is het gesteente een magmatisch, sedimentair of metamorf gesteente en waarom. (10)
2. Geef aan, indien het een magmatisch gesteente is, of sprake is van een dieptegesteente (intrusief gesteente) of van een vulkanisch (extrusief) gesteente en waarom. Indien het gesteente sedimentair is geef dan aan of sprake is van een klastisch of niet-klastisch gesteente en waarom. En als het een metamorf gesteente is geef dan aan of het regionaal- of contactmetamorf is en waarom. (5)
3. Beschrijf de hoofdmineralen in het gesteente en gebruik hiervoor de tabel op de achterzijde (30).  
Geef van elk mineraal het volgende aan:
  - de naam,
  - het volumepercentage in de dd,
  - de gemiddelde grootte van kristallen of korrels en
  - de eigenschap(en) waaraan je het mineraal herkent.Let op: het %An van een plagioklaas bepaalt zijn naam, het %An behoort altijd vermeld te worden.
4. Wat is de naam van het gesteente? (10)
5. Indien het een magmatisch gesteente is: motiveer je naamgeving (10)  
Indien het een sedimentair gesteente is: specificeer en motiveer je antwoord (welke zandsteen- of kalksteenvariëteit en waarom) (10)  
Indien het een metamorf gesteente is: wat is de metamorfe graad van het gesteente (faciës) en waarom? (10)



Tentamen ta 1900-deel 5b:

Macroscopische beschrijving van collectie nr:  
door:  
st.nr.:

Voor dit onderdeel krijg je een houten lade waarin acht gesteentehandstukken liggen. Beantwoord voor elk handstuk de volgende vragen. Maak voor het antwoord gebruik van de onderstaande tabellen.

1. Tot welke hoofdgroep behoort het gesteente (magmatisch, sedimentair of metamorf) en waarom? (10)
2. Geef aan, indien het een magmatisch gesteente is, of sprake is van een dieptegesteente (intrusief gesteente) of van een vulkanisch (extrusief) gesteente en waarom. Indien het gesteente sedimentair is geef dan aan of sprake is van een klastisch of niet-klastisch gesteente en waarom. En als het een metamorf gesteente is geef dan aan of het regionaal- of contactmetamorf is en waarom. (5)
3. Welke hoofdmineralen zijn aanwezig? (20)
4. Wat is de naam van het gesteente? (10)
5. Indien het een magmatisch gesteente is: motiveer je naamgeving (10). Indien het een sedimentair gesteente is: specificeer en motiveer je antwoord (welke zandsteen- of kalksteenvariëteit) (10). Indien het een metamorf gesteente is: wat is de metamorfe graad van het gesteente (faciës) en waarom? (10)

vraag	Nummer gesteente:
1	
2	
3	
4	
5	
vraag	Nummer gesteente:
1	
2	
3	
4	
5	
vraag	Nummer gesteente:
1	
2	
3	
4	
5	

#### Puntentelling

Per steen zijn 55 punten te behalen. In totaal 440. Het door jou behaald aantal punten gedeeld door 44 geeft het cijfer voor dit onderdeel. Dit cijfer wordt afgerond op 1 decimaal. Ook het deelcijfer voor het microscopische onderdeel wordt afgerond op 1 decimaal. Het gemiddelde van deze twee cijfers geeft het cijfer voor ta1900 – deel 5.

## 2. Inleiding

### 2.1. Kristallen, mineralen en gesteenten

#### Mineralen

Een definitie die vaak gebruikt wordt voor het begrip mineraal luidt als volgt: een mineraal is een stof met een min of meer constante chemische samenstelling die gevormd is door een natuurlijk, anorganisch proces. Een mineraal is dus niets anders dan een chemische verbinding die weergegeven kan worden met een chemische formule. Bijvoorbeeld:  $\text{SiO}_2$ . Chemici spreken over 'siliciumdioxide', geologen geven deze verbinding de naam 'kwarts'. De bovengenoemde definitie is eigenlijk niet geheel compleet. Niet alleen de chemische samenstelling bepaalt de naam maar ook de wijze waarop de chemische bouwstenen met elkaar verbonden zijn, in het rooster gerangschikt zijn. In een mineraal zijn de atomen, ionen of moleculen regelmatig gerangschikt in een repeterend driedimensionaal patroon. Dit wordt de kristallijne structuur van het mineraal genoemd. Een mineraalnaam is dus altijd gekoppeld aan een bepaalde chemische verbinding én aan een bepaalde kristallijne structuur. Het is mogelijk dat de chemische bouwstenen van een bepaalde chemische verbinding op verschillende manieren een kristallijne structuur kunnen opbouwen. Dat is bijvoorbeeld het geval met de chemische verbinding ' $\text{FeS}_2$ '. In het ene geval wordt het mineraal pyriet genoemd, in het andere geval markasiet: zelfde chemische samenstelling maar een andere interne rangschikking van de ijzer en zwavel. Dit verschijnsel wordt 'polymorfisme' genoemd. Hebben twee mineralen echter dezelfde kristallijne opbouw en dezelfde chemische samenstelling dan dragen zij dezelfde naam, ook al lijken zij ogenschijnlijk niet op elkaar

#### Kristallen

Er is een relatie tussen de woorden 'kristal' en 'kristallijn'. Het begrip 'kristal' wordt gedefinieerd als een driedimensionaal lichaam met intern een regelmatige rangschikking van de chemische bouwstenen. Een kristal is met andere woorden een materie met een kristallijne structuur. In het ideale geval wordt deze kristallijne materie begrensd door mooie vlakken en ontstaat een geometrische vorm die extern vaak een zekere symmetrie laat zien. Welke (kristal)vorm ontstaat is afhankelijk van de chemische samenstelling. Elk mineraal wordt gekarakteriseerd door een vaststaande chemische samenstelling en kristallijne structuur – elk mineraal wordt met andere woorden gekarakteriseerd door een bepaalde kristalvorm. Het mineraal krijgt deze ideale vorm echter alleen als het onder ideale omstandigheden kan (uit)groeien. Meestal is dit echter niet het geval. Omdat de kristallijne opbouw wel degelijk aanwezig is, wordt de volgende beschrijving gehanteerd:

Euhedrisch (idiomorf) kristal:	de kristallijne materie wordt aan de buitenkant begrensd door natuurlijk gevormde kristalvlakken.
Anhedrisch (xenomorf) kristal:	de kristallijne materie wordt aan de buitenkant niet begrensd door natuurlijk gevormde kristalvlakken.
Subhedrisch (hypidiomorf) kristal:	de kristallijne materie wordt aan de buitenkant deels begrensd door natuurlijk gevormde kristalvlakken.

#### Gesteenten

Gesteenten vormen lichamen in de aarde die veelal zijn opgebouwd uit één of meerdere mineraalsoorten die al dan niet met elkaar verbonden zijn. Een gesteente ontstaat door een natuurlijk proces.

### 2.2. Enkele chemische begrippen

Mineralen zijn dus chemische verbindingen. Voor het begrip van mineralen is enige chemische kennis onontbeerlijk. In vogelvlucht worden enkele basisprincipes besproken.

Een atoom bestaat uit een kern en elektronen:

Kern:           protonen: positieve lading  
                  neutronen: neutrale lading

Elektronen:    In een kern zijn evenveel neutronen als protonen aanwezig, zij hebben dezelfde massa  
                  Deze bevinden zich in banen rond de kern. Een elektron heeft een negatieve lading, tegengesteld aan die van een proton. Elektronen zijn zeer licht en vormen het grootste volume van het atoom.

Een atoom heeft in principe evenveel protonen als elektronen en is dus neutraal qua lading. In de natuur bestaan allerlei atomen met een variabel aantal protonen. Deze atomen hebben een naam gekregen, het worden 'elementen' genoemd. De elementen zijn naar hun oplopend aantal protonen gerangschikt in het 'periodiek systeem van de elementen' (zie figuur 1).

Periodic Table of the Elements																											
1 IA												13 3A		14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A									
1	1 <b>H</b> 1.00794											13 <b>B</b> 10.811	14 <b>C</b> 12.011	15 <b>N</b> 14.0067	16 <b>O</b> 15.9994	17 <b>F</b> 18.9984	18 <b>He</b> 4.00260										
2	3 <b>Li</b> 6.941	4 <b>Be</b> 9.01218											5 <b>B</b> 10.811	6 <b>C</b> 12.011	7 <b>N</b> 14.0067	8 <b>O</b> 15.9994	9 <b>F</b> 18.9984	10 <b>Ne</b> 20.1797									
3	11 <b>Na</b> 22.9898	12 <b>Mg</b> 24.3050	3 <b>B</b>	4 <b>Al</b>	5 <b>Si</b>	6 <b>P</b>	7 <b>S</b>	8 <b>Cl</b>	9 <b>Ar</b>	10 <b>K</b>	11 <b>Ca</b>	12 <b>Sc</b>	13 <b>Ti</b>	14 <b>V</b>	15 <b>Cr</b>	16 <b>Mn</b>	17 <b>Fe</b>	18 <b>Co</b>	19 <b>Ni</b>	20 <b>Cu</b>	21 <b>Zn</b>	22 <b>Ga</b>	23 <b>Ge</b>	24 <b>As</b>	25 <b>Se</b>	26 <b>Br</b>	27 <b>Kr</b>
4	19 <b>K</b> 39.0983	20 <b>Ca</b> 40.078	21 <b>Sc</b> 44.9559	22 <b>Ti</b> 47.88	23 <b>V</b> 50.9415	24 <b>Cr</b> 51.9961	25 <b>Mn</b> 54.9380	26 <b>Fe</b> 55.847	27 <b>Co</b> 58.9332	28 <b>Ni</b> 58.69	29 <b>Cu</b> 63.546	30 <b>Zn</b> 65.39	31 <b>Ga</b> 69.723	32 <b>Ge</b> 72.59	33 <b>As</b> 74.9216	34 <b>Se</b> 78.96	35 <b>Br</b> 79.904	36 <b>Kr</b> 83.80									
5	37 <b>Rb</b> 85.4678	38 <b>Sr</b> 87.62	39 <b>Y</b> 88.9059	40 <b>Zr</b> 91.224	41 <b>Nb</b> 92.9064	42 <b>Mo</b> 95.94	43 <b>Tc</b> (98)	44 <b>Ru</b> 101.07	45 <b>Rh</b> 102.906	46 <b>Pd</b> 106.42	47 <b>Ag</b> 107.868	48 <b>Cd</b> 112.411	49 <b>In</b> 114.82	50 <b>Sn</b> 118.710	51 <b>Sb</b> 121.75	52 <b>Te</b> 127.60	53 <b>I</b> 126.905	54 <b>Xe</b> 131.29									
6	55 <b>Cs</b> 132.905	56 <b>Ba</b> 137.327	*La 138.906	72 <b>Hf</b> 178.49	73 <b>Ta</b> 180.948	74 <b>W</b> 183.85	75 <b>Re</b> 186.207	76 <b>Os</b> 190.2	77 <b>Ir</b> 192.22	78 <b>Pt</b> 195.08	79 <b>Au</b> 196.967	80 <b>Hg</b> 200.59	81 <b>Tl</b> 204.383	82 <b>Pb</b> 207.2	83 <b>Bi</b> 208.980	84 <b>Po</b> (210)	85 <b>At</b> (210)	86 <b>Rn</b> (222)									
7	87 <b>Fr</b> (223)	88 <b>Ra</b> 226.025	†Ac 227.028	104 (261)	105 (262)	106 (263)	107 (262)	108 (265)	109 (266)																		

* Lanthanide series:	58 <b>Ce</b> 140.12	59 <b>Pr</b> 140.908	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.965	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.925	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.930	68 <b>Er</b> 167.26	69 <b>Tm</b> 168.934	70 <b>Yb</b> 173.04	71 <b>Lu</b> 174.967
† Actinide series:	90 <b>Th</b> 232.038	91 <b>Pa</b> 231.036	92 <b>U</b> 238.029	93 <b>Np</b> 237.048	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (252)	101 <b>Mn</b> (258)	102 <b>Lr</b> (259)	103 (260)

Figuur 1: het periodiek systeem der elementen

In dit periodiek systeem worden de namen van de elementen weergegeven met een afkorting. Het aantal protonen (en dus het aantal elektronen) wordt aangegeven met het getalletje boven de afkorting: dit wordt het atoomnummer genoemd. Het getal onder de afkorting geeft de atomaire massa, dit is het aantal protonen + het aantal neutronen. In een gewoon atoom is het aantal protonen gelijk aan het aantal neutronen. Er kunnen echter meer neutronen dan protonen aanwezig zijn, is dit het geval dan is sprake van meerdere 'isotopen'. De atomaire massa geeft de gemiddelde waarde en dit getal wordt dus bepaald door de verhouding die in de natuur aanwezig is tussen atomen en isotopen.

Volgens Bohr cirkelen de elektronen in banen rond de kern. Deze banen zijn met behulp van getallen, kwantumgetallen, te beschrijven:

n: Hoofdkwantumgetal. Dit getal beschrijft de afstand van de banen tot de kern, deze neemt toe met een oplopend getal voor n.

- n=1 K-schil: maximaal 2 elektronen
- n=2 L-schil: maximaal 8 elektronen
- n=3 M-schil: maximaal 18 elektronen
- n=4 N-schil: maximaal 32 elektronen
- n=5 O-schil: maximaal 50 elektronen
- n=6 P-schil: maximaal 72 elektronen
- n=7 Q-schil: maximaal 98 elektronen

l: Nevenkwantumgetal. Dit getal beschrijft de vorm van de baan

- l=0 s-baan: de baan is cirkelvormig
- l=1 p-baan: de baan is een kleine ellips
- l=2 d-baan: de ellipticiteit van de baan neemt toe
- l=3 s-baan: de baan heeft de maximale ellipticiteit

s: Spinkwantumgetal. Dit getal geeft aan hoe het elektron om zijn as draait: s is +1/2 of -1/2.

m: Magnetisch kwantumgetal. Dit getal geeft en eventueel magneetveld weer.



De elektronen zullen posities innemen met een zo laag mogelijke energie-inhoud. Dat betekent globaal dat de schillen vanaf de kern opgevuld worden: eerst de K-schil, dan de L-schil, et cetera. De mate waarin de buitenste aanwezige schil gevuld is met elektronen bepaalt het chemische gedrag van een element. Is deze schil niet geheel gevuld dan kan elektronenuitwisseling met andere atomen plaatsvinden. Is de buitenste schil wél geheel gevuld met elektronen dan is de configuratie zo stabiel dat het element zich inert gedraagt. Dit wordt een edelgasconfiguratie genoemd, de bijbehorende elementen 'edelgassen'. Niet-edelgassen kunnen een stabiele configuratie verkrijgen door elektronen op te nemen of af te staan. Bijvoorbeeld:  $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e$ ;  $\text{Cl} + e \rightarrow \text{Cl}^-$ . Er ontstaan geladen deeltjes, dit worden ionen genoemd (kationen: positief; anionen: negatief). De valentie van een atoom wordt bepaald door het aantal (valentie-)elektronen dat de buitenste schil kan afstaan of opnemen.

Interactie tussen de elektronen in de buitenste schillen levert bindingen op tussen atomen of ionen: er ontstaan moleculen. Er kunnen diverse typen bindingen tussen atomen, ionen of moleculen ontstaan. Het type binding, of de typen bindingen, die in een mineraal aanwezig zijn bepalen voor een groot deel de fysische eigenschappen van het mineraal. De belangrijkste bindingstypen:

- Van der Waals binding. Dit is een zwakke binding tussen moleculen die berust op de aanwezige cohesie. Hoe groter de moleculen des te sterker zijn de cohesieve krachten. Waar in een kristalopbouw van der Waals bindingen aanwezig zijn is het mineraal niet sterk. Vormen deze bindingen vlakken binnen de opbouw dan zal het mineraal hierlangs vaak gemakkelijk splijten.
- Waterstof brug. Waterstof, H, heeft maar één elektron om een binding mee aan te gaan. Toch gaat waterstof vaak twee bindingen aan. Eén daarvan is sterk, de andere is zwak – dit is de waterstof-brug.
- Metaalbinding. Atomen die gemakkelijk elektronen afstaan en zo positieve ionen vormen worden metaalionen genoemd. Een binding waarbij alleen metaalionen een rol spelen wordt een metaalbinding genoemd. In deze binding worden de positief geladen ionen bijeen gehouden door de cohesieve krachten die de kernen op elkaar uitoefenen. De valentie-elektronen bewegen zich vrij door de structuur, dit heeft een goed geleidingsvermogen tot gevolg. De fysische eigenschappen van mineralen waarin deze binding een rol speelt zijn zeer variabel.
- Covalente binding. Dit is een binding tussen atomen. Deze ontstaat als twee atomen, niet noodzakelijkerwijs van het zelfde element, één elektron uit de buitenste schil samen delen waardoor de buitenste schillen van beide atomen geheel gevuld zijn. Is sprake van atomen van hetzelfde element dat wordt ook wel over een 'dative binding' gesproken.
- Ionbinding. Dit is een electrovalente binding. Een binding tussen atomen die gemakkelijk één of meerdere elektronen kunnen afstaan (kationen) of juist kunnen opnemen (anionen). De sterkte van de binding wordt bepaald door de kracht waarmee de ionen elkaar aantrekken. Mineralen waarin alleen ionbindingen een rol spelen zijn doorgaans sterk en hard, ook de overige eigenschappen zijn hoog.

De ionbinding is in zeer veel scheikundige verbindingen, en dus in mineralen, het essentiële bindingstype. Factoren die de ionbinding beïnvloeden zijn:

- De lading van de ionen en de verdeling van de lading
- De straal van de ionen, deze wordt bepaald door:
  - De hoeveelheid protonen, neutronen en elektronen: een toename hiervan betekent een toename van de ionstraal.
  - De mate van ionisatie: kationen zijn kleiner dan het bijbehorende atoom, anionen zijn juist groter.
  - De coördinatie: deze wordt aangegeven door het coördinatiegetal
  - De polarisatie van het ion
- De verhouding tussen de aanwezige ionstralen. De straal ratio, of radius ratio ( $r_{\text{kation}}/r_{\text{anion}}$ ) bepaalt de mogelijke omringing:
 

ratio:	< 0.15	2 omringing
	0.15-0.22	3 omringing
	0.22-0.41	4 omringing
	0.41-0.73	6-8 omringing
	circa 1	12 omringing

De grootte van een ion en zijn valentie bepalen of een ion in een (kristallijne) structuur past of niet. Hebben twee ionen dezelfde iongrootte en dezelfde valentie dan is het waarschijnlijk dat deze ionen in een structuur elkaars plaats kunnen innemen. Dat gebeurt in de natuur dan ook regelmatig. Het mineraal olivijn bijvoorbeeld wordt chemisch weergegeven als  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ .  $\text{Mg}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{2+}$  hebben ongeveer dezelfde grootte, zij

kunnen elkaar onbeperkt vervangen binnen de structuur van olivijn. Vandaar dat in de definitie van het begrip mineraal staat: 'een stof met een min of meer constante chemische samenstelling'.

### 2.3. De kristallijne structuur

Binnen een structuur is de stapeling van atomen, ionen en moleculen zo compact mogelijk. Een zo efficiënt mogelijke stapeling is het beste te begrijpen als de chemische bouwstenen voorgesteld worden als harde, rigide bolletjes ('knikkers') met dezelfde grootte. Vullen we een laag zo compact mogelijk met deze bollen dan liggen de bollen strak tegen elkaar gerangschikt: elke bol wordt omgeven door zes andere bollen en door zes identieke driehoekige gaten. De efficiëntste opvulling van een volume bestaat uit een stapeling van dergelijke identieke lagen bollen. Deze stapeling kan op twee manieren:

- AB AB AB: De lagen met bollen hebben om en om een gelijke ligging binnen de stapeling. Dit wordt de hexagonale dichtste bolstapeling genoemd.
- ABC ABC: De eerste, tweede en derde laag zijn afwijkend qua ligging binnen de structuur. Deze opvolging wordt herhaald. Dit wordt de kubische dichtste bolstapeling genoemd.

De stapeling levert niet alleen een compacte regelmatige rangschikking van bollen, er ontstaat tevens een regelmatig patroon van 'gaten' tussen de bollen. De gaten kunnen twee vormen aannemen:

- Tetraëdergaten: elk gat wordt omgeven door 4 bollen, het gat heeft de vorm van een tetraëder.
- Octaëdergaten: elk gat wordt omgeven door 6 bollen, het gat heeft de vorm van een octaëder.

In een hexagonale en kubische dichtste bolstapeling bevinden zich evenveel bollen en gaten, de verdeling van de bollen en gaten is echter anders.

Deze bolstapelings worden gevormd door anionen. De kationen zijn kleiner en vullen, afhankelijk van hun grootte, tetraëder- en/of octaëdergaten. Deze opvulling is doorgaans regelmatig: er ontstaat een symmetrisch patroon met gevulde en eventueel nog lege gaten.

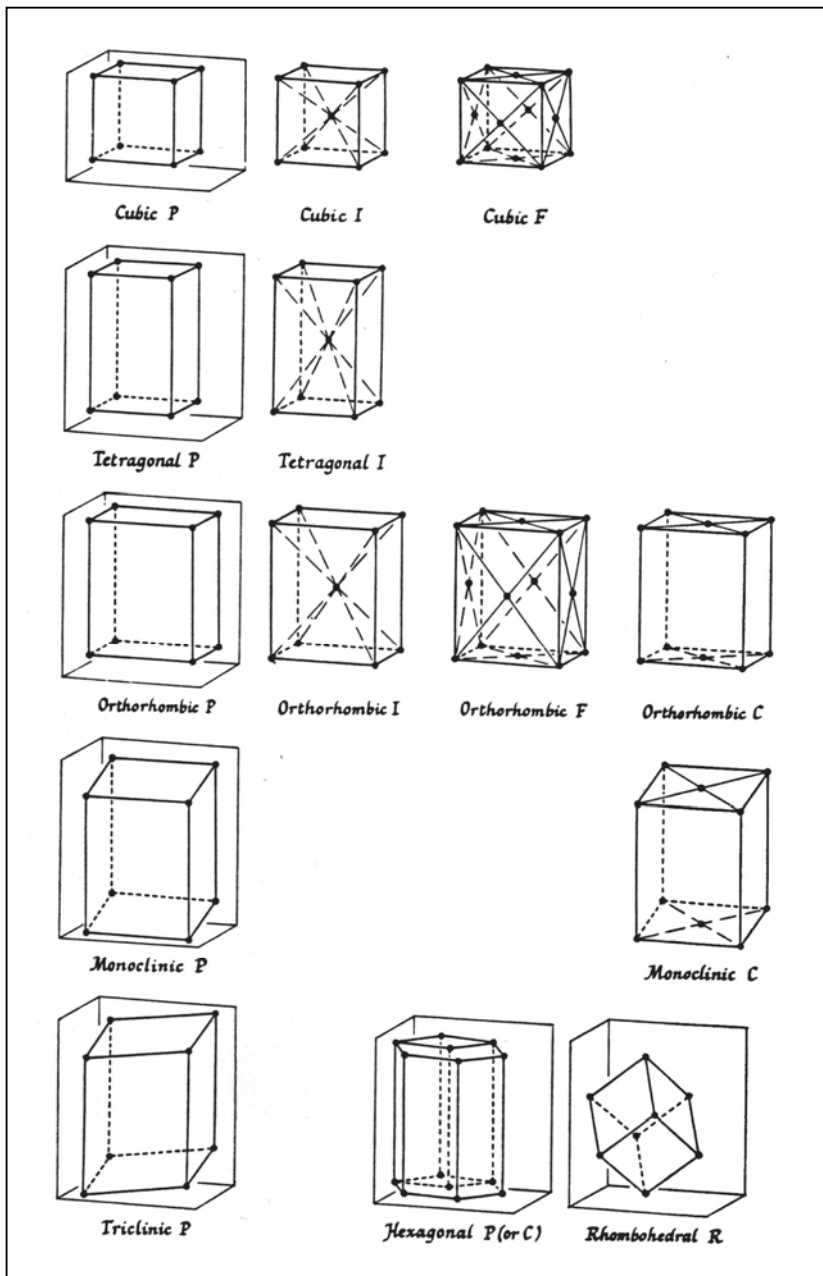
In werkelijkheid is deze geschetste opbouw zelden perfect. De aanname dat anionen voorgesteld kunnen worden als harde rigide bolletjes is in de eerste plaats al niet correct. Bovendien kunnen anionen complexe bouwstenen vormen als bijvoorbeeld  $\text{CO}_3^{2-}$  of  $\text{SO}_4^{4-}$ , deze hebben zeker geen ronde vorm. Ook kationen kunnen de regelmatige structuur beïnvloeden. Door bijvoorbeeld net te groot te zijn voor het gat waar ze in willen zitten kunnen ze de structuur deformereren. Om de opbouw van een kristallijne structuur te begrijpen wordt daarom niet alleen naar het type stapeling gekeken. Het is gebruikelijk om binnen de stapeling de kleinste eenheid aan te wijzen waarin alle chemische elementen en de ordening hiervan aanwezig zijn. Door deze kleinste eenheid, de eenheidscel, systematisch te stapelen kan de gehele kristallijne structuur verkregen worden. In het ideale geval ontstaat door deze stapeling van de eenheidscel een euhedrisch, of idiomorf, kristal.

De chemische samenstelling, de wijze van stapelen (de kristallijne structuur) en de aanwezige bindingstypen die een rol spelen binnen de stapeling bepalen de fysische eigenschappen van minerale. De kristalvorm wordt besproken in hoofdstuk 3. Overige eigenschappen worden besproken in hoofdstuk 4.

# 3. Kristallografie

## 3.1. Inleiding

Kristallografie is de leer van de kristallen. In hoofdstuk 2 (2.1) is al uitgelegd wat kristallen precies zijn, wanneer zij euhedrisch, anhedrisch of subhedrisch genoemd worden. Euhedrische kristallen geven de beste informatie over de interne rangschikking van de chemische bouwstenen: het externe uiterlijk is een directe afspiegeling van de interne opbouw. De interne structuur bestaat uit een regelmatige herhaling van de kleinste eenheid waarin alle chemische bouwstenen en de hierbij behorende ordening aanwezig is. Deze kleinste eenheid wordt de eenheidscel genoemd. De kristallograaf A. Bravais heeft vastgesteld dat er in natuurlijke kristallen slechts 14 verschillende eenheidscellen voorkomen, naar de ontdekker worden deze eenheidscellen in de kristallografie 'Bravais roosters' genoemd (zie figuur 2)



*Figuur 2: de veertien Bravais roosters  
Bron: Battey. Mineralogy for students (1981)*

Elk mineraal bestaat uit een regelmatige herhaling van één van deze Bravais roosters. Deze herhaling vindt plaats door middel van spiegelen, roteren, inverteren, transleren of combinaties hiervan. Deze processen leveren een compact, symmetrisch bouwwerk op. We spreken dan ook niet van herhalingsmechanismen maar van symmetrie-operaties. Deze symmetrie-operaties worden uitgevoerd met symmetrie-elementen. Uitgaande van de 14 Bravais roosters bestaan er voor de interne chemische opbouw 230 mogelijkheden om een structuur op te bouwen. Deze 230 combinaties worden 'ruimgroepen' of 'space groups' genoemd. In het ideale geval leveren deze ruimgroepen euhedrische kristallen op die begrensd worden door kristalvlakken. Als de externe symmetrie van deze kristalvorm wordt beschreven kan dit niet door te letten op de eenheidscellen, die kunnen we immers niet zien. Wel kan gekeken worden naar de symmetrische opbouw van de kristalvorm, er komen 32 combinaties voor. Deze externe symmetrie is eveneens karakteristiek voor het mineraal. Het herkennen van de kristalvorm van een mineraal vergemakkelijkt de determinatie van het mineraal.

### 3.2. Symmetrie-elementen

De volgende symmetrie-elementen spelen een rol bij de studie van kristalvormen:

**Inversiecentrum** Een kristal heeft een inversiecentrum, of symmetriecentrum, indien elk vlak, elke ribbe, en elk hoekpunt van het kristal via een puntspiegeling (inversie) rond het centrum van het kristal samenvalt met een vlak, ribbe of hoekpunt aan de tegengestelde zijde van het kristal. Notatie: *i* (inversion)

**Symmetrievlak**



Een symmetrievlak, of spiegelvlak, is een denkbeeldig vlak door het kristal dat het kristal in twee gelijke helften verdeelt en wel zodanig dat de twee helften elkaars spiegelbeeld zijn. Notatie: *m* (mirror)

**Symmetrie-as**

Een symmetrie-as (rotation axis) is een denkbeeldige lijn, as, door het kristal waar omheen het kristal een symmetrische opbouw vertoont. In het eenvoudigste geval betekent dit dat, indien het kristal rond deze as gedraaid wordt, na rotatie over een bepaalde hoek dekking plaatsvindt. Dat wil zeggen dat de stand van het kristal in de ruimte, de aanblik van het kristal, overeenkomt met de uitgangsstand (dezelfde vlakken, ribben en hoeken zijn zichtbaar). Rotatie vindt plaats over een hoek van  $360^\circ/n$ . Indien  $n=1$  zal het kristal na rotatie over  $360^\circ$  samenvallen met zijn uitgangsstand. Elk kristal bezit een ontelbaar aantal van dergelijke assen, deze zijn met andere woorden niet relevant. Wel relevant zijn de assen waarbij  $n$  gelijk is aan 2, 3, 4 of 6:



Tweetallige symmetrie-as.  $n=2$ : rotatie over  $180^\circ$ . Notatie: 2 of  $\bullet$



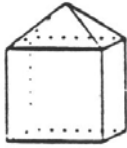
Drietallige symmetrie-as.  $n=3$ : rotatie over  $120^\circ$ . Notatie: 3 of  $\blacktriangle$



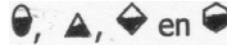
Viertallige symmetrie-as.  $n=4$ : rotatie over  $90^\circ$ . Notatie: 4 of  $\blacklozenge$



Zestallige symmetrie-as.  $n=6$ : rotatie over  $60^\circ$ . Notatie: 6 of  $\blacklozenge$



Over het algemeen zijn deze symmetrie-assen bipolair, dat wil zeggen dat de beide uiteinden van de as dezelfde vlakkencombinatie laten zien, ze zijn elkaars spiegelbeeld. Is dit niet het geval dan wordt de symmetrie-as een polaire as genoemd. Zo bestaat een tweetallige, drietallige, viertallige en zestallige polaire symmetrie-as. Vaak worden deze polaire assen niet apart genoteerd en krijgen ze de notatie van de vergelijkbare 'gewone', bipolaire assen. In dit dictaat krijgen deze assen wel een afzonderlijke notatie: de polariteit wordt aangegeven met voor de helft 'gevulde' tekens, respectievelijk:



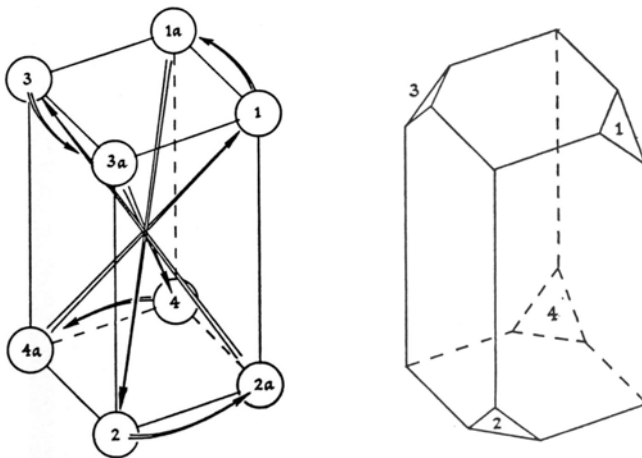
In enkele gevallen kan de bestudering van de symmetrische vlakkenopbouw rond een as niet volstaan door alléén te letten op de herhaling van een bepaalde vlakkencombinatie na rotatie over een aantal graden, eventueel in combinatie met een symmetrievlak loodrecht op de as ('gewone', bipolaire assen). Sommige kristalvormen bezitten symmetrie-assen die weliswaar aan beide uiteinden dezelfde vlakkencombinatie vertonen doch geen symmetrievlak loodrecht op de as hebben. Het lijkt alsof de vlakkencombinaties ten opzichte van elkaar 'verdraaid' zijn. De symmetrische opbouw die wel degelijk aanwezig is kan niet met behulp van een symmetrievlak aangetoond worden. In deze gevallen kan de symmetrie rond een as alleen aangetoond worden door een rotatie te combineren met een inversie (puntspiegeling). Deze symmetrie-assen worden 'inversie-assen' (axes of rotoinversion) genoemd. Slechts twee inversie-assen zijn relevant:

Drietallige inversie-as: een vlakkencombinatie herhaalt zich niet na rotatie van  $120^\circ$ , maar is wel vanaf dit punt ( $120^\circ$  vanaf het uitgangspunt) geïnverteerd aan de tegenoverliggende zijde van het kristal zichtbaar.

Notatie:  $\bar{3}$  of  $\Delta$ .

Viertallige inversie-as: een vlakkencombinatie herhaalt zich niet na rotatie van  $90^\circ$ , maar is wel vanaf dit punt ( $90^\circ$  vanaf het uitgangspunt) geïnverteerd aan de tegenoverliggende zijde van het kristal zichtbaar. Het principe van de viertallige inversie-as wordt in figuur 4 gedemonstreerd.

Notatie:  $\bar{4}$  of  $\blacklozenge$ .



Figuur 4: het principe van de viertallige inversie-as

### 3.3. Kristalklassen (puntgroepen) en kristalstelsels

De genoemde symmetrie-elementen komen in allerlei combinaties voor, dit aantal is echter eindig. In de natuur komen slechts 32 combinaties voor, dit worden kristalklassen of puntgroepen genoemd. In figuur 7 wordt een overzicht gegeven van de 32 kristalklassen met de bijbehorende symmetrie-elementen en namen. Vaker echter worden de kristalklassen met symbolen aangeduid, deze symbolen geven zeer beknopt de symmetrie-eigenschappen van de desbetreffende kristalklasse weer. Een voorbeeld: de ditetragonale bipyramidale klasse wordt aangegeven met het symbool  $4/m2/m2/m$  (uitspraak: 4 over m, 2 over m, 2 over m). Dit betekent:

- 4/m: De viertallige symmetrie-as (4) staat loodrecht op een symmetrievlak (/m).  
 2/m: Er zijn tweetallige assen aanwezig, deze staan alle loodrecht op een symmetrievlak. Er staat echter 2/m2/m. Dit betekent dat er twee sets met tweetallige assen aanwezig zijn, die niet identiek aan elkaar zijn. Beide sets staan loodrecht op een set symmetrievlakken.

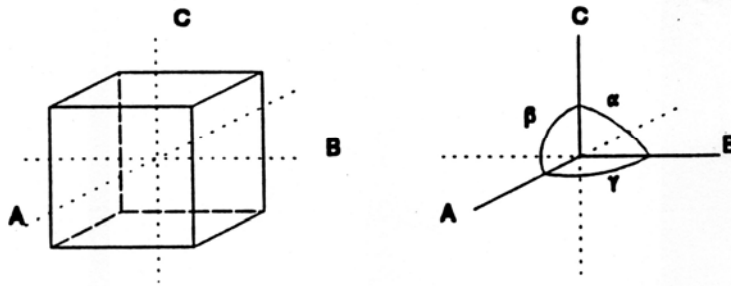
Tussen bepaalde kristalklassen is een sterke overeenkomst wat betreft de symmetrie aanwezig. Dit komt omdat de eenheidscel die de kristallijne structuur opbouwt een overeenkomstige vorm heeft. Zo zijn er bijvoorbeeld 7 kristalklassen die één viertallige as hebben, 5 klassen die wel vier drietallige assen hebben. Deze klassen die overeenkomende symmetrie-eigenschappen laten zien vormen samen een kristalstelsel (zie figuur 7). Er worden 7 kristalstelsels onderscheiden:

<u>Kristalstelsels:</u>	<u>overeenkomstige symmetrie-eigenschappen:</u>
Trikliën stelsel:	geen symmetrie óf een inversiecentrum
Monokliën stelsel:	één symmetrievlak en/of één tweetallige as
Orthorhombisch stelsel:	drie tweetallige symmetrie-assen en/of meerdere symmetrievlakken
Trigonaal stelsel:	één drietallige symmetrie-as
Tetragonaal stelsel:	één viertallige symmetrie-as
Hexagonaal stelsel:	één zestallige symmetrie-as
Kubisch stelsel	vier drietallige symmetrie-assen

In moderne literatuur wordt er op dit moment ook (weer) voor gekozen om het trigonale en het hexagonale stelsel samen te voegen. Reden voor deze samenvoeging ligt in het gegeven dat mogelijk dezelfde eenheidscel ten grondslag ligt aan de kristallijne opbouw van de mineralen die tot deze stelsels behoren. Binnen elk stelsel is altijd één kristalklasse aanwezig die de hoogste symmetrie heeft, dit wordt de holosymmetrische klasse genoemd. Door de externe symmetrie van het kristal te bestuderen kan direct de kristal-klasse en het kristalstelsel bepaald worden. Dit is een zeer belangrijk gegeven. Het is dan echter nog niet duidelijke hoe het kristal er precies uitziet, welke vlakken aanwezig zijn. Om de kristallen en kristalvlakken zo goed mogelijk te kunnen beschrijven is een 'referentiekader' ontwikkeld, dit worden 'kristallografische assen' genoemd.

### 3.4. Kristallografische assen

In het eenvoudigste geval is het kristallografische assenstelsel een driedimensionaal orthogonaal assenstelsel. Het snijpunt van deze assen valt samen met het middelpunt van het kristal. In dit dictaat worden deze assen de A-, B- en C-as genoemd (in literatuur wordt ook X-, Y- en Z-as gebruikt, of a<sub>1</sub>-, a<sub>2</sub>- en a<sub>3</sub>-as, ed). De afspraak is dat de positieve kant van de A-as vanaf het snijpunt van de assen naar voren, naar de kijker toe, wijst (de negatieve kant dus naar achteren), de positieve B-as naar rechts wijst en de positieve C-as naar boven. De hoek tussen de positieve A- en B-as wordt  $\gamma$  genoemd, de hoek tussen de positieve B- en C-as wordt  $\alpha$  genoemd en de hoek tussen de positieve A- en C-as wordt  $\beta$  genoemd (zie figuur 5)



*Figuur 5: een orthogonaal assenstelsel met een A-, B- en C-as, en de hoeken  $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$ .*

Het is niet zo dat elk stelsel met hetzelfde kristallografische assenstelsel beschreven kan worden. Elk kristalstelsel heeft een karakteristieke set kristallografische assen.  
 De afspraken per kristalstelsel:

Kubisch stelsel:  $A = B = C, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 De A-, B- en C-as vallen samen met de drie viertallige symmetrie-assen óf, als deze er niet zijn, met drie, qua positie hiermee overeenkomende, tweetallige assen.

Tetragonaal stelsel:  $A = B \neq C$  (C kan kleiner of groter zijn dan A en B),  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 De C-as valt samen met de viertallige symmetrie-as. Indien in het horizontale vlak tweetallige symmetrie-assen aanwezig zijn dan vallen deze samen met de A- en B-as.

Orthorhombisch stelsel:  $A \neq B \neq C, A < B, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 Indien 3 tweetallige symmetrie-assen aanwezig zijn dan vallen deze samen met de A-, B- en C-as.

Monoklien stelsel:  $A \neq B \neq C, \alpha = \gamma = 90^\circ \quad \beta > 90^\circ$   
 Indien een tweetallige symmetrie-as aanwezig is dan valt deze samen met de B-as.

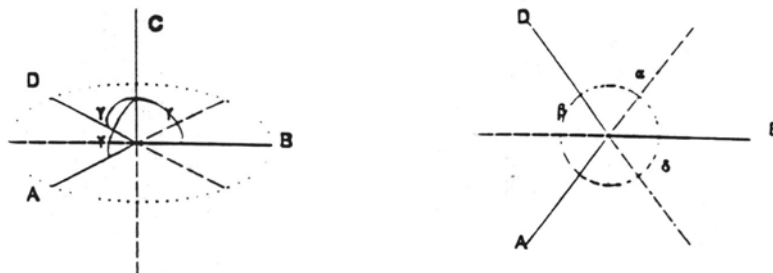
Triklien stelsel:  $A \neq B \neq C, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

Trigonaal stelsel en Hexagonaal stelsel  
 Deze stelsels kunnen eveneens met een A-, B- en C-as beschreven worden. Gezien de symmetrie die een herhaling van kristallografische gegevens om de  $60^\circ$  of  $120^\circ$  laat zien is het echter eenvoudiger om deze stelsels met vier kristallografische assen te beschrijven. Zoals in de overige stelsels staat de C-as vertikaal. De overige drie assen, de A-, B- en de D-as staan hier loodrecht op – deze liggen met andere woorden in het horizontale vlak. De hoeken tussen de positieve delen van deze assen bedragen  $120^\circ$ . Als ook de negatieve zijden van de assen meegenomen worden bedragen de hoeken tussen de assen steeds  $60^\circ$ . De oriëntatie van de assen ligt vast: De positieve B-as wijst, als in de overige stelsels, naar rechts. De positieve A-as wijst naar linksvoor, de positieve D-as naar linksachter. Zie de schematische tekeningen in figuur 6.

Samenvattend:  $A = B = D \neq C$  (C kan kleiner of groter zijn dan A, B en D),  
 $\alpha = \beta = \delta = 120^\circ, \gamma = 90^\circ$

Trigonaal stelsel: de C-as komt overeen met de drietallige symmetrie-as. Zijn in het horizontale vlak tweetallige symmetrie-assen aanwezig dan vallen deze samen met de kristallografische A-, B-, en D-as.

Hexagonaal stelsel: de C-as komt overeen met de zestallige symmetrie-as. Zijn in het horizontale vlak tweetallige symmetrie-assen aanwezig dan vallen deze samen met de kristallografische A-, B-, en D-as



Figuur 6: de kristallografische assen in het trigonale en hexagonale stelsel

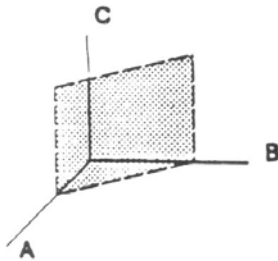
KRISTALSTELSEL		SYMBOOL	SYMMETRIE ELEMENTEN						
↓	KRISTALKLASSEN		SYMMETRIEASSEN			SYMMETRIEVLAKKEN		i	
			[001]	[010]	[100]	{001}	{010}	{100}	
TRI-KLIEN	t. pediaal	$\frac{1}{1}$	-	-	-	-	-	-	-
	t. pinakoidaal	$\frac{1}{1}$	-	-	-	-	-	-	i
MONO-KLIEN	m. sfenoidaal	$\frac{2}{2}$	-	○	-	-	-	-	-
	m. domatisch	$\frac{2}{2} = m$	-	○	-	-	m	-	-
	m. prismatisch	$\frac{2}{m}$	-	○	-	-	m	-	i
ORTHO-RHOMBISCH	o. pyramidaal	mm2	○	-	-	-	m	m	-
	o. bisfenoidaal	222	○	○	○	-	-	-	-
	o. bipyramidaal	$\frac{2}{m2/m2/m}$	○	○	○	m	m	m	i
			[0001]	[11 $\bar{2}$ 0]	[10 $\bar{1}$ 0]	{0001}	{11 $\bar{2}$ 0}	{10 $\bar{1}$ 0}	
TRIGONAAL	t. pyramidaal	3	▲	-	-	-	-	-	-
	t. rhomboëdrisch	$\frac{3}{3}$	▲	-	-	-	-	-	-
	t. trapezoëdrisch	32	▲	-	3○	-	-	-	-
	dit. pyramidaal	$\frac{3}{m}$	▲	-	-	-	-	3m	-
	dit. skalenoëdrisch	$\frac{3}{2/m}$	▲	3○	-	-	-	3m	i
			[001]	[100]	[110]	{001}	{100}	{110}	
TETRAGONAAL	t. pyramidaal	4	◇	-	-	-	-	-	-
	t. bisfenoidaal	$\frac{4}{4}$	◇	-	-	-	-	-	-
	t. bipyramidaal	$\frac{4}{m}$	◇	-	-	m	-	-	-
	t. trapezoëdrisch	422	◇	2○	2○	-	-	-	-
	dit. pyramidaal	4mm	◇	-	-	-	2m	2m	-
	dit. skalenoëdrisch	$\frac{4}{2m}$	◇	2○	-	-	-	2m	-
dit. bipyramidaal	$\frac{4}{m2/m2/m}$	◇	2○	2○	m	2m	2m	i	
			[0001]	[11 $\bar{2}$ 0]	[10 $\bar{1}$ 0]	{0001}	{11 $\bar{2}$ 0}	{10 $\bar{1}$ 0}	
HEXAGONAAL	h. pyramidaal	6	●	-	-	-	-	-	-
	trig. bipyramidaal	$\frac{6}{6} = 3/m$	●	-	-	m	-	-	-
	h. bipyramidaal	$\frac{6}{m}$	●	-	-	m	-	-	-
	h. trapezoëdrisch	622	●	3○	3○	-	-	-	-
	dih. pyramidaal	6mm	●	-	-	-	3m	3m	-
	ditr. bipyramidaal	$\frac{6}{2m}$	●	-	3○	m	-	3m	-
dih. bipyramidaal	$\frac{6}{m2/m2/m}$	●	3○	3○	m	3m	3m	i	
			[001]	[111]	[110]	{001}	{110}		
KUBISCH	k. pentagon-dodekaëdrisch	23	3○	4▲	-	-	-	-	-
	k. dyakis-dodekaëdrisch	$\frac{2}{m\bar{3}}$	3○	4▲	-	3m	-	-	-
	k. pentagonikositetraëdrisch	432	3◇	4▲	6○	-	-	-	-
	k. hexakis-tetraëdrisch	$\frac{4}{3m}$	3◇	4▲	-	-	6m	-	-
	k. hexakis-octaëdrisch	$\frac{4}{m\bar{3}2/m}$	3◇	4▲	6○	3m	6m	-	i

Figuur 7: overzicht van de 7 kristalstelsels en de 32 kristalklassen



### 3.5. Miller indices

Voor het beschrijven van de kristalvlakken worden de kristallografische assen als referentiekader gebruikt. In de loop der tijden zijn hiervoor diverse systemen gebruikt. De nu-gebruikte methode is ontwikkeld door W.H. Miller, en gebaseerd op een door C.S. Weiss ontwikkelde methode. Weiss beschreef de vlakken door te noteren in welke mate de kristalvlakken de kristallografische assen afsnijden. Weiss bedoelde hiermee een relatieve afsnijding, en die bepaalde hij door de vlakken denkbeeldig uit te breiden in de ruimte tot zij de (denkbeeldige) kristallografische assen raken. Bijvoorbeeld:



De A-as wordt door het gearceerde vlak afgesneden op afstand  $\frac{1}{2}$   
 De B-as wordt door het gearceerde vlak afgesneden op afstand 1  
 De C-as wordt door het gearceerde vlak afgesneden op afstand  $\infty$

De Weiss-indices voor dit vlak:  $(\frac{1}{2}, 1, \infty)$

Miller veranderde de notatie van de Weiss indices. Hij nam voor alle getallen de reciproke waarde. Daarnaast stelde hij als voorwaarde dat in de indices alleen gehele getallen mogen voorkomen (de getallen zijn relatief). In het voorbeeld worden de Miller indices voor het gearceerde vlak:  $(2/1, 1/1, 1/\infty) = (2, 1, 0)$ . Vaak worden de indices zonder komma achter elkaar gezet:  $(2\ 1\ 0)$

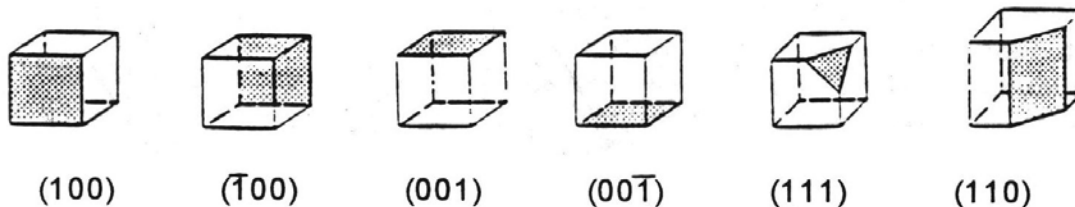
Is de reciproke van een Weiss index geen geheel getal dan moeten alle indices met een zodanige factor vermenigvuldigd worden tot alle indices gehele getallen zijn. Bijvoorbeeld:

Weiss:  $(3, 4, 1)$  wordt Miller:  $(1/3, 1/4, 1/1) = (4, 3, 12)$  of  $(4\ 3\ 12)$

Weiss:  $(1, 2, 3)$  wordt Miller:  $(1/1, 1/2, 1/3) = (6, 3, 2)$  of  $(6\ 3\ 2)$

Is de mate van de afsnijding van de kristallografische assen niet bekend dan worden de Miller indices met  $(hkl)$  weergegeven: h staat voor het intercept van de A-as, k voor het intercept van de B-as en l voor het intercept van de C-as dat afgesneden wordt. Indien sprake is van een trigonaal of een hexagonaal kristal dan komt er een index bij:  $(hklw)$  – w staat voor het intercept van de D-as. Wordt een kristallografische as aan zijn negatieve kant afgesneden dan wordt dit in de Miller indices genoteerd door een min-teken, een streepje dus, boven de index te zetten. Bijvoorbeeld:  $(0\ \bar{3}\ 1)$ , uitspraak: 0, min 3, 1.

Enkele voorbeelden van Miller indices:



In bovenstaande voorbeelden is sprake van een kubisch kristal. Het  $(100)$ -vlak heeft exact hetzelfde uiterlijk als het  $(\bar{1}00)$ -, het  $(010)$ -, het  $(0\bar{1}0)$ -, het  $(001)$ - en het  $(00\bar{1})$ -vlak (als dit niet het geval is, is het kristal niet kubisch!). Bij de beschrijving van het kristal is het dan niet nodig om alle vlakken afzonderlijk te noteren. Er kan volstaan worden met de notatie  $\{100\}$ : dit is de beschrijving van de 'familie van vlakken' die qua uiterlijk gelijk zijn aan het  $(100)$ -vlak. In het kubische stelsel staat  $\{111\}$  dus voor alle vlakken met de vorm van het  $(111)$ -vlak. Gezien de hoge symmetrie van het kubische stelsel kunnen veel vlakken tot dezelfde familie behoren. In het kubische stelsel beschrijft  $\{100\}$  zes vlakken, in het tetragonale stelsel dit vier vlakken.

De kristalvlakken hebben naast indices ook namen (zie ook figuur 14), bijvoorbeeld:

$\{100\}$ -vlakken van kubische kristallen worden hexaëdervlakken genoemd,

$\{100\}$ -vlakken van tetragonale kristallen worden prismavlakken genoemd,

$\{100\}$ -vlakken van monokliene kristallen worden pinakoïdevlakken genoemd.

Naast bovengenoemde notaties komt ook de notatie  $[100]$  voor (zie figuur 7). Indien Miller indices tussen haken staan wordt hier geen vlak mee bedoeld maar de richting loodrecht op het vlak, de loodlijn dus. In het kubische stelsel geeft  $[100]$  de richting loodrecht op het  $(100)$ -vlak weer, dit is met andere woorden de richting van de kristallografische A-as en tevens de richting van één van de viertallige symmetrie-assen.

Dus:  $(100)$ : het vlak met de Miller indices 1, 0, 0

$\{100\}$ : familie van vlakken die overeenkomen met het  $(100)$ -vlak

$[100]$ : de loodlijn op het  $(100)$ -vlak.



In figuur 9 is al aangegeven dat het in de kristallografie gebruikelijk is om alleen de bovenste helft van het kristal te projecteren. Alleen de bovenste helft van de sferische projectie is aanwezig. De punten die op de bol de sferische projectie van de kristalvlakken weergeven worden met denkbeeldige lijntjes verbonden met de zuidpool. Deze verbindingslijntjes 'prikken' door het equatoriale vlak. Deze 'doorprikpunten' worden op het papier aangegeven met punten of kruisjes, het zijn de stereografische projecties van de kristalvlakken. In figuur 9 is het tekenpapier in perspectief getekend, in figuur 10 kijken we van boven af op het tekenpapier. Naast de stereografische projectie van kristalvlakken zijn een aantal lijnen zichtbaar. Deze lijnen geven de stereografische projecties van de symmetrievlakken van dit kristal weer. Symmetrievlakken worden op de bol geprojecteerd door de vlakken in gedachten uit te breiden tot zij de bol raken: de doorsnijding van een vlak en een bol geeft een cirkel. Als deze cirkel met allemaal denkbeeldige lijntje verbonden wordt met de zuidpool geeft dit op het projectiepapier een lijn. De stereografische projectie van een symmetrievlak is met andere woorden een lijn. Ook symmetrie-assen en kristallografische assen worden geprojecteerd. Bij de sferische projectie worden deze assen als punten op de bol weergegeven. Deze punten worden op hun beurt met denkbeeldige lijntjes verbonden met de zuidpool. Waar deze verbindingslijnen door het equatoriale vlak prikken bevinden zich de stereografische projecties van deze assen. Bij de projectiepunten worden de namen van de kristallografische assen gezet. Als sprake is van symmetrie-assen worden de bijbehorende symbolen in de projectie getekend.

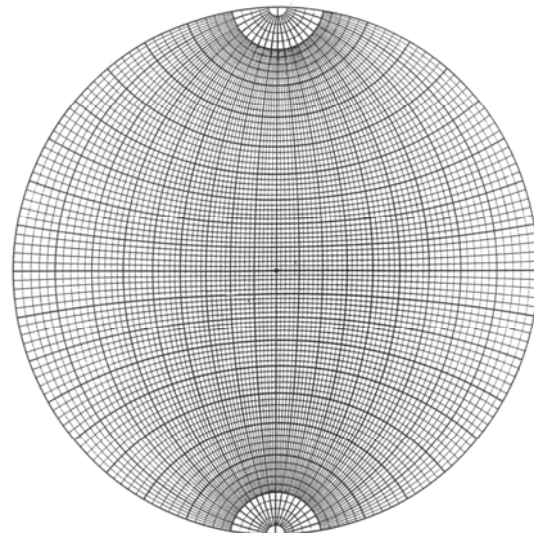
Alléén als sprake is van een polair kristal wordt ook de onderste helft van de bol gebruikt. De sferische projecties van de vlakken worden nu met denkbeeldige lijntjes verbonden met de noordpool en ook deze prikken door het equatoriale vlak. Déze stereografische projecties worden aangegeven met een niet-opgevuld rondje.

Samenvattend: in een stereografische projectie wordt:

- een kristalvlak afgebeeld als een punt
- een kristallografische as afgebeeld als een punt
- een symmetrie-as afgebeeld als een punt
- een symmetrievlak afgebeeld als een lijn

In de projectie zoals in figuur 10 weergegeven blijken de hoekrelaties tussen vlakken en assen misschien nog niet zozeer. Voor deze projectie is echter aangepast papier als tekenpapier gebruikt, namelijk een stereografisch net dat ontwikkeld is door G.V. Wulff, het zogenaamde Wulff net (figuur 11). Op dit Wulff net zijn hoekrelaties wél meteen duidelijk

Het Wulff net is tot stand gekomen na de stereografische projectie van lijnen die ook op een ideale bolvormige aarde zijn te vinden. De aardse meridianen geven, geprojecteerd op het equatoriale vlak, lijnen die door het centrum van het Wulff net gaan. Deze lijnen staan niet op het Wulff net met uitzondering van twee (N-S en E-W). Elk ander vlak door het centrum van de aarde geeft als snijlijn met het aardoppervlak een cirkel. De diameter van deze cirkels komt overeen met de diameter van de aarde: het worden daarom 'grootcirkels' genoemd (ook de meridianen en de equator zijn grootcirkels). Deze grootcirkels geven als stereografische projectie op het equatoriale vlak segmenten van cirkels. Eén set grootcirkels staat op het Wulff net, met intervallen van  $2^\circ$ . In figuur 11 zijn dit de lijnen die van boven naar beneden lopen. Alle andere vlakken die door de aarde snijden, maar niet door het middelpunt, geven eveneens een cirkel als doorsnijding met het aardoppervlak; deze cirkels hebben niet de maximale diameter, het worden 'kleincirkels' genoemd. Op het Wulff net staat één set kleincirkels weergegeven, ook met intervallen van  $2^\circ$ . In figuur 11 zijn dit de



*Figuur 11: het Wulff net*

lijnen die van rechts naar links lopen. Het hele net wordt zo verdeeld in vakjes met zijden van  $2^\circ$ . Indien de stereografische projectie zeer nauwkeurig wordt uitgevoerd op het Wulff net zijn de hoekrelaties zo eenvoudig af te lezen. Tijdens het practicum wordt gewerkt met een vereenvoudigd Wulff net (zie figuur 13).

### 3.7. De habitus van een mineraal, tweelingsvormen

#### De habitus

Een mineraal vormt, op een enkele uitzondering na, steeds kristallen die tot de dezelfde kristalklasse horen. Binnen één klasse kunnen echter vele combinaties van kristalvlakken ontstaan. Mineralen ontwikkelen vaak steeds dezelfde vlakkencombinatie: wáár het mineraal ook ontstaat, steeds ontstaan vergelijkbare vormen. De voorkeursvorm van een mineraal wordt de 'habitus' van een mineraal genoemd.

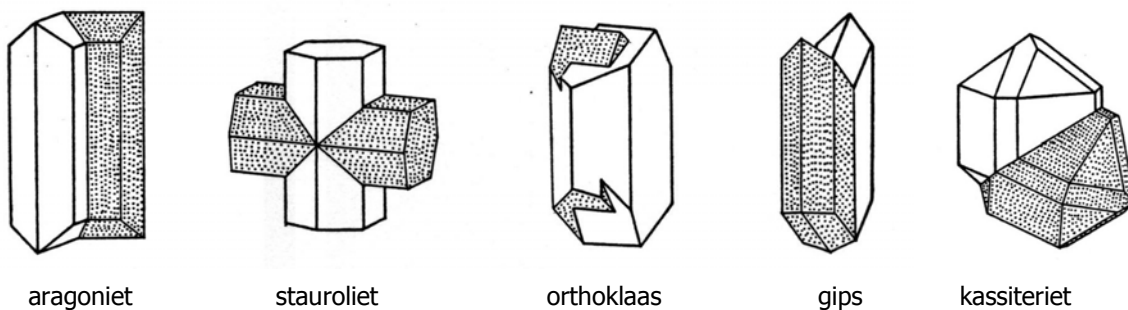
#### Tweelingsvormen

Een enkele keer komen we kristallen tegen die er zeer merkwaardig uitzien: het lijkt of twee (of meerdere) kristallen met elkaar vergroeid zijn. Dit wordt een tweeling (of meerling: drieling, vierling etc.) genoemd.

Een tweeling ontstaat tijdens de groei van het mineraal. Tijdens de groei hechten steeds meer atomen, ionen of moleculen zich aan de al bestaande structuur. Het kan gebeuren dat de structuur of de bouwstenen die zich hieraan willen hechten zó symmetrisch zijn dat de aangroei op meerdere manieren kan plaatsvinden. Hierdoor kan de aangroei van richting veranderen, er ontstaat een tweeling. Het vlak waar de aangroei van richting verandert wordt het tweelingsvlak genoemd.

Tweelingsvormen zijn karakteristiek voor bepaalde chemische verbindingen en de daarbij behorende interne opbouw. Sommige tweelingsvormen zijn zó uniek dat zij karakteristiek zijn voor het mineraal.

Enkele voorbeelden van tweelingsvormen:



*Figuur 12: voorbeelden van mineralen die een zeer karakteristieke tweelingsvorm hebben*

### 3.8. Het practicum kristallografie (onderdeel van TA 1900 - deel 3)

Tijdens het practicum zal gewerkt worden met houten kristalmodellen ('blokjes') die de ideale euhedrische kristalvorm van mineralen weergeven.

#### Oefening 1:

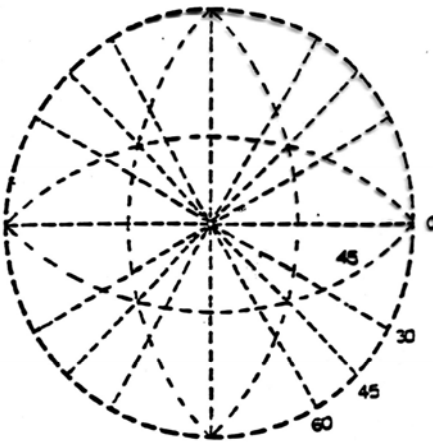
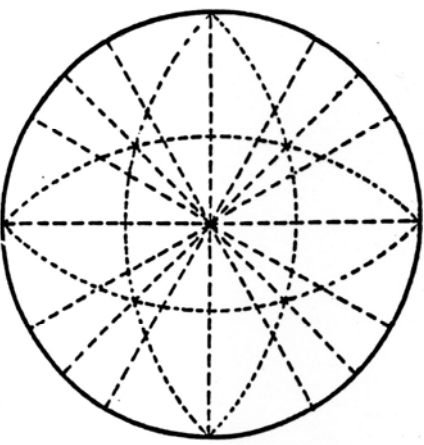
Bepaal de symmetrie-elementen in eenvoudige voorbeelden van zes van de zeven kristalstelsels (triklien ontbreekt). Met behulp van figuur 7 op blz. 20 kan de kristalklasse en het kristalstelsel bepaald worden.

#### Oefening 2:

Bepaal de oriëntatie van de kristallografische assen in dezelfde, of hiermee overeenkomende, kristalmodellen. Bepaal tevens de Miller-indices van de belangrijkste vlakken.

#### Oefening 3:

Bepaal de symmetrie-eigenschappen en de kristallografische eigenschappen van geselecteerde kristalmodellen. Deze gegevens worden vastgelegd in een invulformulier zoals weergegeven wordt in figuur 13. Op dit formulier staan vereenvoudigde versies van het Wulff net. Hierin zijn de belangrijkste hulplijnen voorgetekend: de 45°-grootcirkels en de 0°, 30°, 45°- en 60°-meridianen. Bij A worden symmetrie-elementen, kristalklasse en -stelsel vastgelegd. Bij B worden deze gegevens geprojecteerd. Bij C worden de kristalvlakken geprojecteerd en bij D worden de namen en Miller-indices van de bij C geprojecteerde vlakken opgeschreven. Tijdens het invullen van C en D kan gebruik gemaakt worden van de hulpfiguren die in figuur 14 op de bladzijden 27 t/m 31 verzameld zijn.

<b>NAAM :</b> <b>STUDIENUMMER :</b>	<b>NAAM MINERAAL :</b> <b>NUMMER BLOKJE : S .....</b>																																							
<b>A: SYMMETRIE ELEMENTEN :</b> .. ●    .. ◐ .. ◆    .. ◇    .. ◊ .. ▲    .. △    .. ▴ .. ○    .. ◌ .. m i: kristalklasse : symbool : kristalstelsel :	<b>B: PROJECTIE VAN :</b> • KRISTALLOGRAFISCHE ASSEN • SYMMETRIE ELEMENTEN 																																							
<b>C: PROJECTIE VAN DE DE KRISTALVLAKKEN :</b> 	<b>D: INDICERING VAN DE KRISTALVLAKKEN :</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">no.</th> <th style="text-align: left;">naam</th> <th style="text-align: left;">index</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>.</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>.</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	no.	naam	index	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			.			.		
no.	naam	index																																						
1																																								
2																																								
3																																								
4																																								
5																																								
6																																								
7																																								
8																																								
9																																								
10																																								
.																																								
.																																								

*Figuur 13: voorbeeld van het formulier dat Tijdens het practicum en het tentamen gebruikt wordt voor de analyse van kristalmodellen.*

#### Oefening 4:

De kristalvorm van mineralen is een belangrijke (determinatie-)eigenschap van mineralen. Het blijkt dat de belangrijkste mineralen slechts in een gering aantal klassen uitkristalliseren. Tijdens deze oefening worden voorbeelden uit deze belangrijke klassen bestudeerd. Deze voorbeelden behoren bij mineralen die in het practicumonderdeel mineralogie aan de orde komen, de voorbeelden representeren de habitus van deze mineralen. De opgedane kennis kan met andere woorden direct toegepast worden. Naast de voorbeelden van ideale kristalvormen zijn er tevens enkele tweelingsvormen aanwezig. Deze tweelingsvormen hoeven niet geanalyseerd te worden. Realiseer je dat sommige tweelingsvormen tot de habitus van een mineraal kunnen behoren.

Kristalmodellen van de volgende mineralen zijn aanwezig:

Stelsel	Kristalklasse	Mineralen
Triklien	$\bar{1}$	plagioklaas
Monoklien	2/m	hoornblende, augiet biotiet orthoklaas
Orthorhombisch	2/m2/m2/m	bariet, olivijn
Trigonaal	$\bar{3}2/m$ 32	calciet, kwarts, hematiet kwarts
Hexagonaal	6/m2/m2/m	kwarts
Tetragonaal	$\bar{4}2m$ 4/m2/m2/m	chalcopyriet kassiteriet
Kubisch	$\bar{4}3m$	sfaleriet
	2/m $\bar{3}$	pyriet
	4/m $\bar{3}2/m$	galeniet, granaat

### Het tentamen ta1900-deel 3: onderdeel kristallografie

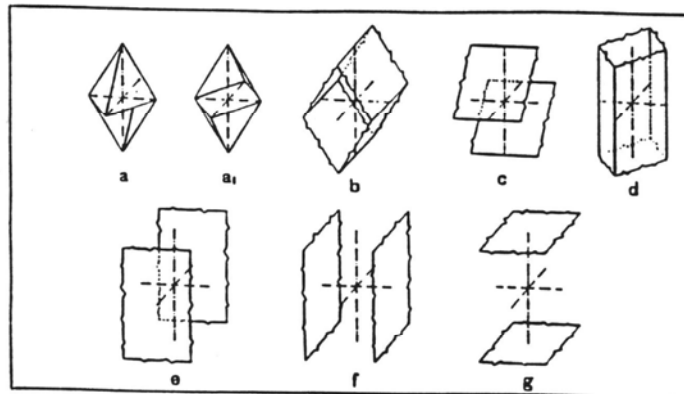
Bovengenoemde lijst komt overeen met de tentamenstof voor het practicum. Tijdens het tentamen wordt gevraagd van drie kristalmodellen een analyse te maken. Hiervoor worden formulieren gebruikt die identiek zijn aan figuur 13. Tijdens het tentamen mogen de figuren 7 en 14 gebruikt worden – deze worden ter plekke uitgedeeld. Het analyseren van de modellen vormt een onderdeel van het gehele tentamen, mineralen worden gelijktijdig getentamineerd. Een voorbeeld van het tentamen staat op bladzijde 6

#### *Figuur 14:*

*Op de volgende pagina's staan voor de belangrijkste kristalklassen hulpfiguren waarin aangegeven staan:*

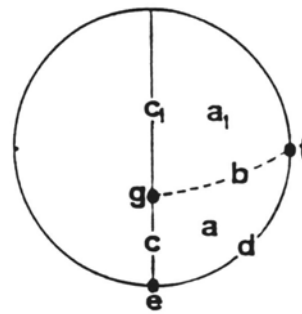
- *projecties van alle mogelijke families van vlakken,*
- *de namen van de vlakken,*
- *het uiterlijk van de vlakken.*

### HET MONOKLIENE STELSEL

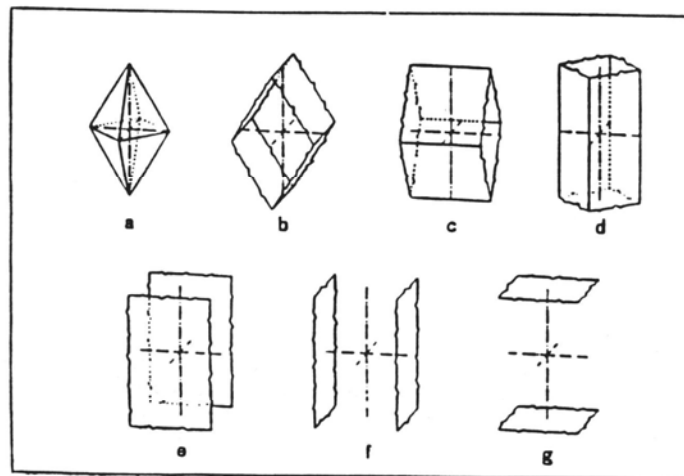


#### monoklien prismatische klasse - $2/m$

a	pyramide	{hkl}
a <sub>1</sub>	pyramide	{ $\bar{h}kl$ }
b	doma	{0kl}
c	doma	{h0l}
c <sub>1</sub>	doma	{ $\bar{h}0l$ }
d	prisma	{hk0}
e	pinakoïde	{100}
f	pinakoïde	{010}
g	basis pinakoïde	{001}

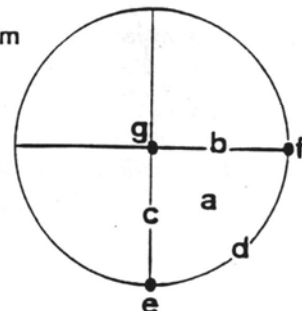


### HET ORTHORHOMBISCHE STELSEL

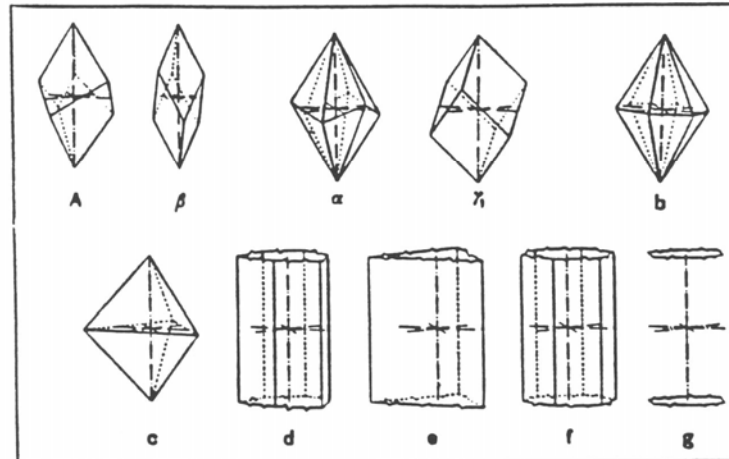


#### orthorhombisch bipyramidale klasse - $2/m2/m2/m$

a	bipyramide	{hkl}
b	doma	{0kl}
c	doma	{h0l}
d	prisma	{hk0}
e	pinakoïde	{100}
f	pinakoïde	{010}
g	basis pinakoïde	{001}

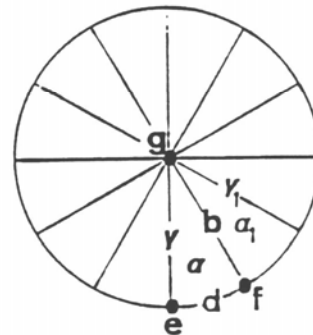


## HET TRIGONALE STELSEL



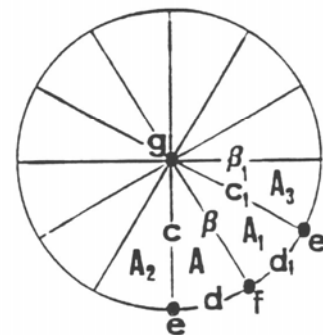
### ditrigonaal skalenoeëdrische klasse - $\bar{3}2/m$

<i>a</i>	skalenoëder	{hk $\bar{w}$ l}
<i>a</i> <sub>1</sub>	skalenoëder	{kh $\bar{w}$ l}
<i>b</i>	hex. bipyramide	{hh $\bar{2}$ hl}
<i>γ</i>	romboëder	{h0 $\bar{h}$ l}
<i>γ</i> <sub>1</sub>	romboëder	{0h $\bar{h}$ l}
<i>d</i>	dihex. prisma	{hk $\bar{w}$ 0}
<i>e</i>	hex. prisma	{10 $\bar{1}$ 0}
<i>f</i>	hex. prisma	{11 $\bar{2}$ 0}
<i>g</i>	basis pinakoïde	{0001}



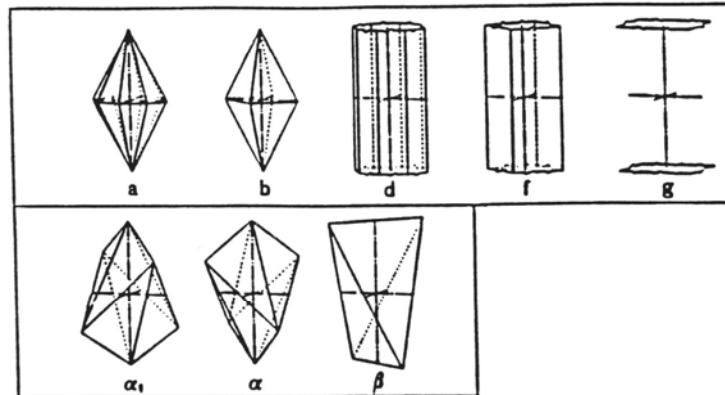
### trigonaal trapezoëdrische klasse - 32

<i>A</i>	trig. trapezoëder	{hk $\bar{w}$ l}
<i>A</i> <sub>1</sub>	trig. trapezoëder	{kh $\bar{w}$ l}
<i>A</i> <sub>2</sub>	trig. trapezoëder	{wk $\bar{h}$ l}
<i>A</i> <sub>3</sub>	trig. trapezoëder	{kw $\bar{h}$ l}
<i>β</i>	romboëder	{hh $\bar{2}$ hl}
<i>β</i> <sub>1</sub>	romboëder	{h $\bar{2}$ h $\bar{h}$ l}
<i>c</i>	trig. bipyramide	{h0 $\bar{h}$ l}
<i>c</i> <sub>1</sub>	trig. bipyramide	{0h $\bar{h}$ l}
<i>d</i>	ditrig. prisma	{hk $\bar{w}$ 0}
<i>d</i> <sub>1</sub>	ditrig. prisma	{kh $\bar{w}$ 0}
<i>e</i>	trig. prisma	{10 $\bar{1}$ 0}
<i>e</i> <sub>1</sub>	trig. prisma	{01 $\bar{1}$ 0}
<i>f</i>	hex. prisma	{11 $\bar{2}$ 0}
<i>g</i>	basis pedion	{0001}



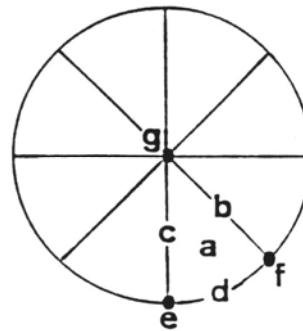


## HET TETRAGONALE STELSEL



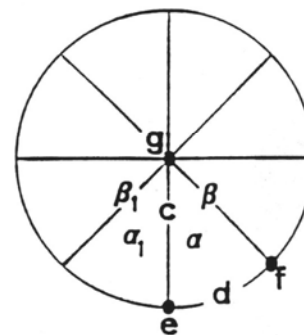
### tetragonaal bipyramidale klasse - $4/m2/m2/m$

a	ditetr. bipyramide	{hkl}
b	tetr. bipyramide	{hhl}
c	tetr. bipyramide	{h0l}
d	ditetr. prisma	{hk0}
e	tetr. prisma	{100}
f	tetr. prisma	{110}
g	basis pinakoïde	{001}

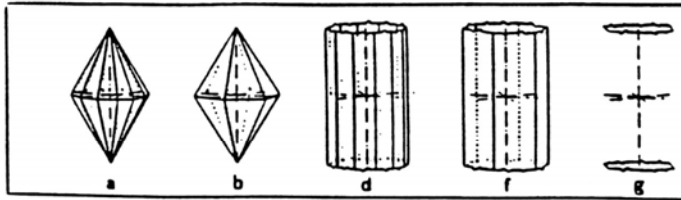


### tetragonaal skalenoeëdrische klasse - $\bar{4}2m$

$\alpha$	skalenoeëder	{hkl}
$\alpha_1$	skalenoeëder	{h $\bar{k}$ l}
$\beta$	bisfenoid	{hhl}
$\beta_1$	bisfenoid	{h $\bar{h}$ l}
c	tetr. bipyramide	{h0l}
d	ditetr. prisma	{hk0}
e	tetr. prisma	{100}
f	tetr. prisma	{110}
g	basis pinakoïde	{001}

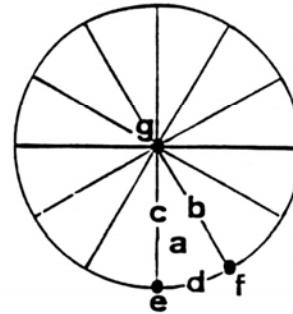


## HET HEXAGONALE STELSEL

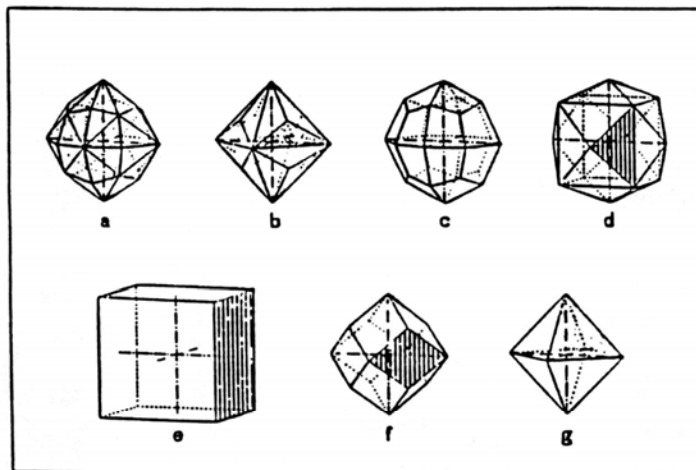


dihexagonaal bipyramidale klasse -  $6/m2/m2/m$

a	dihex. bipyramide	$\{hk\bar{w}l\}$
b	hex. bipyramide	$\{hh2\bar{h}l\}$
c	hex. bipyramide	$\{h0\bar{h}l\}$
d	dihex. prisma	$\{hk\bar{w}0\}$
e	hex. prisma	$\{10\bar{1}0\}$
f	hex. prisma	$\{11\bar{2}0\}$
g	basis pinakoïde	$\{0001\}$

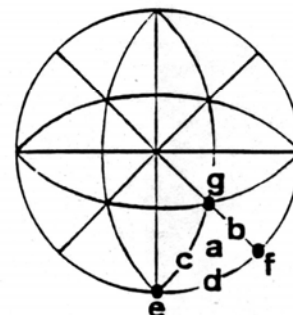


## HET KUBISCHE STELSEL

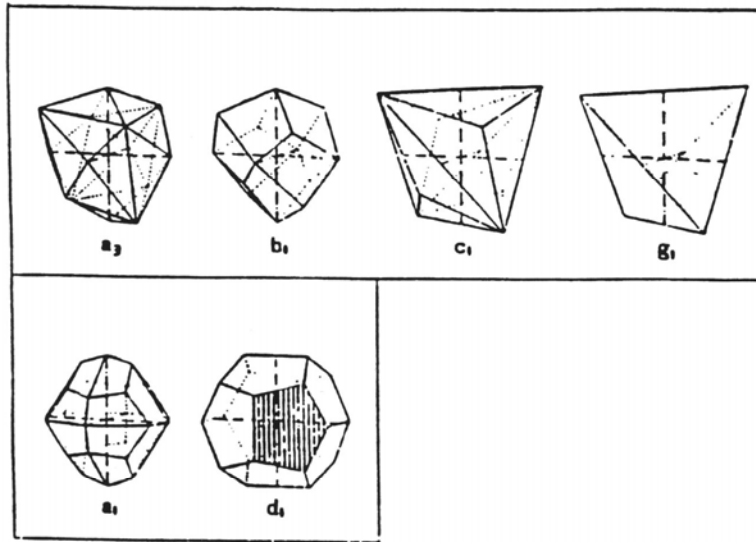


kubisch hexakisoctaëdrische klasse -  $4/m\bar{3}2/m$

a	hexakisoctaëder	$\{hkl\}$
b	triakisoctaëder	$\{h\bar{h}k\}$
c	ikositetraëder	$\{hkk\}$
d	tetrakisohedraëder	$\{hk0\}$
e	hexaëder	$\{100\}$
f	rhombendodekaëder	$\{110\}$
g	octaëder	$\{111\}$

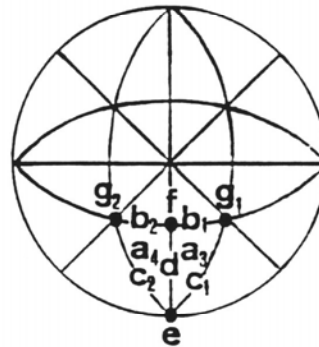


## HET KUBISCHE STELSEL - vervolg



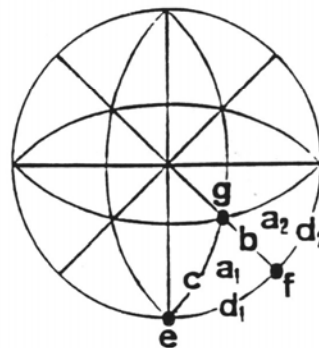
### kubisch hexakistetraëdrische klasse - $\bar{4}3m$

a <sub>3</sub>	hexakistetraëder	{hkl}
a <sub>4</sub>	hexakistetraëder	{h $\bar{l}$ k}
b <sub>1</sub>	deltoiddodekaëder	{hkh}
b <sub>2</sub>	deltoiddodekaëder	{h $\bar{k}$ h}
c <sub>1</sub>	triakistetraëder	{hkk}
c <sub>2</sub>	triakistetraëder	{h $\bar{k}$ k}
d	tetrakishexaëder	{hk0}
e	hexaëder	{100}
f	rhombendodekaëder	{110}
g <sub>1</sub>	tetraëder	{111}
g <sub>2</sub>	tetraëder	{1 $\bar{1}$ 1}



### kubisch dyakisdodekaëdrische klasse - $2/m\bar{3}$

a <sub>1</sub>	dyakisdodekaëder	{hkl}
a <sub>2</sub>	dyakisdodekaëder	{khl}
b	triakisoktaëder	{hkk}
c	ikositetraëder	{hkk}
d <sub>1</sub>	pentagondodekaëder	{hk0}
d <sub>2</sub>	pentagondodekaëder	{kh0}
e	hexaëder	{100}
f	rhombendodekaëder	{110}
g	oktaëder	{111}



## 4. Mineralogie

### 4.1. Systematiek

Mineralen zijn chemische verbindingen met een daarbij horende kristallijne opbouw. Het is gebruikelijk de mineralen naar hun chemische samenstelling in te delen, en wel naar de aanwezige anionen. Vaak wordt de indeling van Strunz of Dana gebruikt. De volgende indeling is gebaseerd op de indeling van Dana:

Elementen	goud (Au), koper (Cu)
Sulfiden	pyriet (FeS <sub>2</sub> ), galeniet (PbS)
Oxiden en hydroxiden	hematiet (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), magnetiet (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
Halogeniden	haliet (NaCl)
Carbonaten, e.a.	calciet (CaCO <sub>3</sub> )
Sulfaten, fosfaten, wolframaten	bariet (BaSO <sub>4</sub> ), apatiet (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH), wolframiet (MnWO <sub>4</sub> )
Silicaten	kwarts (SiO <sub>2</sub> ), granaat (Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )

Er zijn circa 4000 verschillende mineralen. Deze zijn met hulp van diverse analysetechnieken (chemisch, XRD, microprobe, AAS) te determineren. Macroscopisch en microscopisch onderzoek is relatief snel en goedkoop. Deze twee technieken komen tijdens het vak ta 1900 aan de orde (resp. hoofdstuk 4 en 5).

### 4.2. Kristalstructuren

Elementen:

Slechts enkele elementen komen in zuivere vorm in de natuur voor, zoals goud (Au), zilver (Ag), koper (Cu), diamant (C), grafiet (C) en zwavel (S). In de meeste zuivere verbindingen zijn de atomen gerangschikt in een kubische dichtste bolstapeling. De eigenschappen van mineralen uit deze groep kunnen ver uiteen liggen (bijvoorbeeld: diamant - grafiet).

Sulfiden, arseniden, telluriden:

Dit is een grote groep mineralen met de algemene formule A<sub>m</sub>X<sub>n</sub>, het grootste deel van de ertsmineralen behoort tot deze groep. Volgens een gangbare definitie zijn ertsmineralen die mineralen waar metaal uit gewonnen kan worden. In de practicumcollectie zijn de volgende voorbeelden aanwezig:

Basisformule:	AX:	galeniet:	PbS
		sfaleriet:	ZnS
	AX <sub>2</sub> :	chalcopryiet:	CuFeS <sub>2</sub>
		pyriet:	FeS <sub>2</sub>

In galeniet hebben zowel de kationen als de anionen een kubische dichtste bolstapeling. Elk Pb-ion is omgeven door zes S-ionen en elk S-ion is omgeven door zes Pb-ionen. Hierdoor ontstaat een vlakkengecentreerde kubische eenheidscel met óf de Pb- óf de S-ionen in de hoekpunten. De bijbehorende kristallen behoren tot de holosymmetrische klasse van het kubische systeem. Pyriet heeft een vergelijkbare structuur. De S<sup>2-</sup> uit PbS is nu echter vervangen door haltervormige S<sub>2</sub><sup>4-</sup>. De oriëntatie van de S<sub>2</sub>-helters alterneert echter waardoor de kubische symmetrie van pyriet tweetallig wordt in plaats van viertallig.

In sfaleriet zijn de anionen in een kubische dichtste bolstapeling gerangschikt. De kationen vullen de helft van de tetraëdergaten op. De verdeling van Zn<sup>2+</sup> levert een hoge kubische symmetrie op. De structuur van chalcopryiet is identiek aan die van sfaleriet. De helft van de Zn<sup>2+</sup> is echter vervangen door Fe<sup>2+</sup>, de andere helft door Cu<sup>2+</sup>. Door de aanwezigheid van twee verschillende kationen is de eenheidscel tweemaal zo groot als die van sfaleriet, chalcopryiet heeft hierdoor een tetragonale symmetrie.

In sulfiden kunnen zowel ionbindingen, metaalbindingen als covalente bindingen een rol spelen. De eigenschappen lopen hierdoor sterk uiteen. De meeste sulfiden zijn opake mineralen, de kleur en de streep zijn vaak karakteristiek.

## Oxiden en hydroxiden:

Dit is een grote groep mineralen. In de practicumcollectie zijn echter slechts drie mineralen uit deze groep aanwezig: hematiet ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetiet ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en goethiet ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Volgens de classificatie van Strunz behoren ook de kwartsvarianten ( $\text{SiO}_2$ ) tot de groep van de oxiden. Moderne classificatiesystemen, zoals het systeem van Dana, rekenen de mineralen van de kwartsgroep tot de silicaten. Kwarts wordt in deze handleiding bij de (tecto)silicaten besproken.

In hematiet zijn de zuurstofionen in een hexagonale dichtste bolstapeling gerangschikt. De  $\text{Fe}^{2+}$ -ionen vullen volgens een regelmatig patroon tweederde van de octaëdergaten. Doordat de opvulling van de gaten niet compleet is en er sprake is van een sterke ionbinding tussen de Fe- en O-ionen is de hexagonale bolstapeling licht gedeformeerd waardoor het mineraal geen hexagonale maar een trigonale symmetrie heeft.

In goethiet vormen de O- en de (OH)-ionen gezamenlijk een hexagonale dichtste bolstapeling.  $\text{Fe}^{3+}$ -ionen vullen de octaëdergaten. Door de aanwezigheid van twee soorten anionen is de hexagonale symmetrie gereduceerd tot een orthorhombische symmetrie.

Magnetiet,  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ , is een lid van de spinelgroep en heeft een spinelstructuur. In de spinelstructuur zijn de O-ionen gerangschikt volgens een bijna perfecte kubische bolstapeling. Eén eenheidscel bestaat uit 32  $\text{O}^{2-}$ -ionen. Tussen de zuurstofionen bevinden zich 64 tetraëdergaten en 32 octaëdergaten. In de gewone spinelstructuur zijn 16 octaëdergaten gevuld met het driewaardige kation en 8 tetraëdergaten met het tweewaardige kation. Voor magnetiet zou dit betekenen dat de  $\text{Fe}^{3+}$  dan in de octaëdergaten zit en de  $\text{Fe}^{2+}$  in de tetraëdergaten. Dit is echter niet het geval: de helft van de  $\text{Fe}^{3+}$ -ionen bevindt zich in de octaëdergaten, de andere helft zit in de tetraëdergaten. Alle  $\text{Fe}^{2+}$ -ionen bevinden zich in de octaëdergaten. Dit wordt een inverse spinelstructuur genoemd. Magnetietkristallen hebben een zeer hoge symmetrie, zij kristalliseren uit in de holosymmetrische klasse van het kubische stelsel.

Oxiden worden vaak gevormd door sterke ionbindingen waardoor de mineralen doorgaans hoge eigenschappen hebben: hard, een hoge dichtheid en brekingsindex. Vaak zijn het primaire mineralen. Hydroxiden zijn echter vaak zachte mineralen en vormen vaak (secundair) aardachtige massa's.

## Halogeniden:

In de practicumcollectie zijn geen halogeniden aanwezig. Haliet, NaCl, is het bekendste mineraal uit deze groep. De halietstructuur is eenvoudig en komt overeen met de structuur van galeniet. De eenheidscel van haliet is een kubus met in de hoekpunten ofwel Na- ofwel Cl-ionen.

## Carbonaten:

Calciet ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomiet ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) en sideriet ( $\text{FeCO}_3$ ) zijn aanwezig in de practicumcollectie. In de structuur van deze verbindingen is het complexe  $\text{CO}_3^{2-}$ -anion de belangrijkste bouwsteen. Tussen het  $\text{C}^{4+}$ -ion en de  $\text{O}^{2-}$ -ionen zijn sterke bindingen aanwezig.

De calcietstructuur kan afgeleid worden van de haliet- of galenietstructuur. De kubus van galeniet of haliet moet op een punt gezet worden, dus met de lichaamsdiagonaal vertikaal, om de calcietstructuur te verkrijgen. De ionen in de hoekpunten en in het midden van de vlakken worden vervangen door  $\text{Ca}^{2+}$ . De overige ionen worden vervangen door  $\text{CO}_3^{2-}$ . Zowel de  $\text{Ca}^{2+}$ - als de  $\text{CO}_3^{2-}$ -ionen zijn in lagen gerangschikt. De  $\text{CO}_3^{2-}$ -ionen hebben een planaire structuur, deze vlakke anionen zijn loodrecht op de lichaamsdiagonaal van de oorspronkelijke kubus georiënteerd. Binnen deze lagen met anionen zijn de  $\text{CO}_3^{2-}$ -ionen niet allemaal gelijk gericht. Hierdoor, en doordat deze complexe anionen niet bolvormig zijn wordt de kubische eenheidscel uitgerekt in de richting van de lichaamsdiagonaal waardoor de kubische symmetrie verloren gaat. Calciet is trigonaal en kristalliseert in de ditrigonaal skalenoëdrische klasse. Sideriet heeft een vergelijkbare structuur: de Ca-ionen worden vervangen door Fe-ionen.

De structuur van dolomiet komt eveneens overeen met de structuur van calciet. In dolomiet is echter de helft van de Ca vervangen door Mg; deze ionen hebben echter een afwijkende iongrootte. Er ontstaat een afwisseling met Ca-lagen en Mg-lagen loodrecht op de drietallige as. Hierdoor wordt de symmetrie van dolomiet lager.

Door hun laagsgewijze opbouw hebben carbonaten parallel aan en loodrecht op deze lagen afwijkende eigenschappen. Vooral de brekingsindex in deze twee richtingen verschilt sterk waardoor deze mineralen gekarakteriseerd worden door een enorm hoge dubbelbreking (zie hoofdstuk 5).

## Sulfaten en fosfaten:

Voorbeelden zijn bariet ( $\text{BaSO}_4$ ) en apatiet ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$ ).

In bariet zijn de O-ionen in een kubische dichtste bolstapelingsgerangschikt. De S-ionen vullen tetraëdergaten op. Tussen deze twee typen ionen is een zeer sterke ionbinding aanwezig waardoor zeer stabiele  $\text{SO}_4^{2-}$ -eenheden ontstaan. Deze  $\text{SO}_4^{2-}$ -eenheden zijn zeer fundamenteel binnen de structuur. Het Ba-ion is zeer zwaar en bevindt zich tussen 12 O-ionen. De verdeling geeft een orthorhombische symmetrie.

In apatiet zijn de  $(\text{PO}_4)^{3-}$ -eenheden de fundamentele bouwstenen. De Ca vult tetraëdergaten op tussen de O- en OH-ionen op. De verdeling levert een hexagonale symmetrie op.

## Silicaten:

Dit is een zeer uitgebreide groep mineralen waartoe de meeste gesteentevormende mineralen behoren. De silicaten worden opgebouwd uit  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -tetraëders. Het  $\text{Si}^{4+}$ -ion wordt omgeven door vier  $\text{O}^{2-}$ -ionen. Het  $\text{Si}^{4+}$ -ion kan in veel mineralen deels vervangen worden door het  $\text{Al}^{3+}$ -ion dat min of meer dezelfde ionstraal heeft:  $(\text{Si,Al})\text{O}_4^{4-}$ . De kationen bevinden zich in de gaten tussen de  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -tetraëders. De silicaten worden onderverdeeld naar de wijze waarop de  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -tetraëders met elkaar verbonden zijn (zie ook figuur 15):

### Nesosilicaten (eilandsilicaten):

Nesosilicaten zijn opgebouwd uit onafhankelijke tetraëders, de tetraëders delen geen O-ionen, de basisformule is  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , Si:O = 1:4. Tussen de tetraëders zijn kationen aanwezig die voor een neutrale structuur zorgen. In de practicumcollectie zijn de volgende nesosilicaten aanwezig:

Olivijn	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$
Granaat	$\text{R}_3\text{R}_2(\text{SiO}_4)_3$ (R staat voor verschillende elementen, zie bladzijde 45)
Andalusiet	$\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
Kyaniet	$\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
Sillimaniet	$\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
Stauroliet	$\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O,OH})_2$

### Sorosilicaten (dubbele tetraëders):

In sorosilicaten zijn twee tetraëders met elkaar verbonden, de tetraëders delen één O-ion, de basisformule is  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ , Si:O = 1:3.5. In de practicumcollectie zijn geen voorbeelden uit deze groep aanwezig.

### Overgang nesosilicaten-sorosilicaten:

Epidoot is een voorbeeld van een silicaat waarin zowel enkele als dubbele tetraëders aanwezig zijn.

Epidoot  $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$

### Cyclosilicaten (ringsilicaten):

De structuur van cyclosilicaten bestaat uit een opeenstapeling van onafhankelijke ringen van tetraëders. Deze ringen kunnen samengesteld zijn uit drie tetraëders,  $(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$ , vier tetraëders,  $(\text{Si}_4\text{O}_{12})^{8-}$  of uit zes tetraëders,  $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ . In alle gevallen is Si:O = 1:3. Een bekend voorbeeld uit deze groep is het mineraal toermalijn. In de practicumcollectie zijn geen voorbeelden uit deze groep aanwezig.

### Inosilicaten (ketensilicaten): enkele of dubbele ketens.

Enkele ketens. Tetraëders liggen in een rij om ketens te vormen. Binnen een keten alterneert de oriëntatie van de tetraëders. Elke tetraëder deelt twee O-ionen met zijn buurtetraëder, de basisformule wordt  $(\text{SiO}_3)^{2-}$ , Si:O = 1:3. Mineralen die tot de groep van de pyroxenen behoren hebben een dergelijke structuur.

Dubbele ketens: Om een structuur met dubbele ketens te verkrijgen worden twee enkele ketens met elkaar verbonden. Doordat de twee ketens spiegelbeeldig georiënteerd zijn passen ze precies aan elkaar. Er ontstaan in feite ketens die bestaan uit aaneengesloten ringen van zes tetraëders. Basisformule:  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$ , Si:O = 1:2.75. Mineralen die tot de groep van de amfibolen behoren hebben een dergelijke structuur.

In de practicumcollectie zijn de volgende inosilicaten aanwezig:

Enkele ketens:	Augiet	$(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe,Al})\{(\text{Si,Al})_2\text{O}_6\}$
Dubbele ketens:	Actinoliet	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
	Glaucofaan	$\text{Na}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
	Hoornblende	$(\text{Na,Ca})_{2-3}(\text{Mg,Fe,Al})_5\{(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}\}(\text{OH})_2$

Fyllosilicaten (bladsilicaten):

De structuur van de fyllosilicaten bestaat uit een opeenstapeling van lagen die opgebouwd zijn uit tetraëders. Ringen van zes tetraëders verbinden zich in een tweedimensionaal patroon waardoor lagen ontstaan. Elke tetraëder raakt drie andere tetraëders waardoor de basisformule  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$  wordt,  $\text{Si}:\text{O} = 1:2.5$ .

Binnen de tetraëderingen wijzen de toppen van de tetraëders allemaal dezelfde kant op. Tussen de O-ionen die de toppen van de tetraëders vormen bevindt zich een (OH)-ion. De  $\text{Si}^{4+}$  -ionen kunnen deels vervangen worden door  $\text{Al}^{3+}$  -ionen. De ringen met tetraëders kunnen op verschillende manieren gestapeld worden waardoor de structuur binnen de groep toch veel verschillen laat zien. Door de verschillende mogelijkheden voor de stapeling ontstaan ook verschillende configuraties van gaten die ook weer op verschillende manieren met kationen gevuld kunnen worden waardoor ingewikkelde formules ontstaan. De volgende fyllosilicaten zijn aanwezig:

Glimmers (mica's):	Muscoviet	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
	Biotiet	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
Chlorietgroep:	Chloriet	$(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})_{12}\{(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}\}(\text{OH})_{16}$
Kleimineralen:	Illiet	$\text{KAl}_4(\text{Si}_7\text{AlO}_{20})(\text{OH})_4$
	Montmorilloniet	$(\text{Al},\text{Mg})_4\{(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}\}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Glaucioniet	verwant aal illiet
	Kaoliniet	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$

Tectosilicaten (netwerksilicaten):

De tetraëders vormen een driedimensionaal netwerk. Elke tetraëder is verbonden met vier andere tetraëders. Hierdoor wordt de basisformule  $(\text{SiO}_2)^0$ ,  $\text{Si}:\text{O} = 1:2$ . De bekendste tectosilicaat is het mineraal kwarts,  $\text{SiO}_2$ . In de groep van de tectosilicaten vindt vaak een gedeeltelijke substitutie plaats van  $\text{Si}^{4+}$  door  $\text{Al}^{3+}$ . De ladingsverschillen die hierdoor ontstaan worden door verschillende kationen gecompenseerd. In de practicumcollectie zijn de volgende tectosilicaten aanwezig:

Kwartsgroep:	Kwarts	$\text{SiO}_2$
	Chalcedoon	$\text{SiO}_2$
	Opaal	$\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Foïden	Nefelien	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
	Leuciet	$\text{K}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$
Alkaliveldspaten:	Microklien	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
	Orthoklaas	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
	Sanidien	$(\text{K},\text{Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
Plagioklaas	Albiet	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
	Anorthiet	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

### 4.3. Macroscopisch onderzoek van mineralen

De chemie en de kristallijne opbouw staan garant voor een karakteristieke combinatie van fysische eigenschappen. Een aantal hiervan is macroscopisch, eventueel met behulp van een loep, goed te bestuderen. Tijdens het practicum wordt dit in de praktijk gebracht (ta 1900-deel 3). De volgende eigenschappen zijn van belang:

#### Kristalvorm

Deze eigenschap is behandeld in hoofdstuk 3

#### Dichtheid (D) en soortelijk gewicht (s.g.):

D De massa van een volume eenheid, bijvoorbeeld xx gram/cm<sup>3</sup>.

s.g. De verhouding tussen het gewicht van een bepaald volume van het mineraal en het gewicht van hetzelfde volume water ( $T_w = 4^\circ\text{C}$ ). Dit is dus een getal zonder dimensies.

Tijdens het practicum worden D en het s.g. niet nauwkeurig bepaald. Wel kan het s.g. van een mineraal geschat worden door het gewicht van het mineraal te vergelijken met het gewicht van mineralen met een bekend s.g. en een vergelijkbaar volume.

De aanwezige referentiemineralen zijn:

kwarts: s.g. = 2.6

bariet: s.g. = 4.5

wolframiet: s.g. = 7.5

<p>Inosilicates (double chain)</p>		<p>Amphibole e.g. Anthophyllite, <math>Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2</math></p>
<p>Phyllosilicates</p>		<p>Mica e.g. Phlogopite, <math>KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2</math></p>
<p>Tectosilicates</p>		<p>High cristobalite, <math>SiO_2</math></p>

<p>Class</p>	<p>Arrangement of <math>SiO_4</math> tetrahedra (central <math>Si^{4+}</math> not shown)</p>	<p>Unit composition</p>	<p>Mineral example</p>
<p>Nesosilicates</p>		<p><math>(SiO_4)^{4-}</math></p>	<p>Olivine, <math>(Mg, Fe)_2SiO_4</math></p>
<p>Sorosilicates</p>		<p><math>(Si_2O_7)^{6-}</math></p>	<p>Hemimorphite, <math>Zn_4Si_2O_7(OH) \cdot H_2O</math></p>
<p>Cyclosilicates</p>		<p><math>(Si_6O_{18})^{12-}</math></p>	<p>Beryl, <math>Be_3Al_2Si_6O_{18}</math></p>
<p>Inosilicates (single chain)</p>		<p><math>(Si_2O_5)^{4-}</math></p>	<p>Pyroxene e.g. Enstatite, <math>MgSiO_3</math></p>

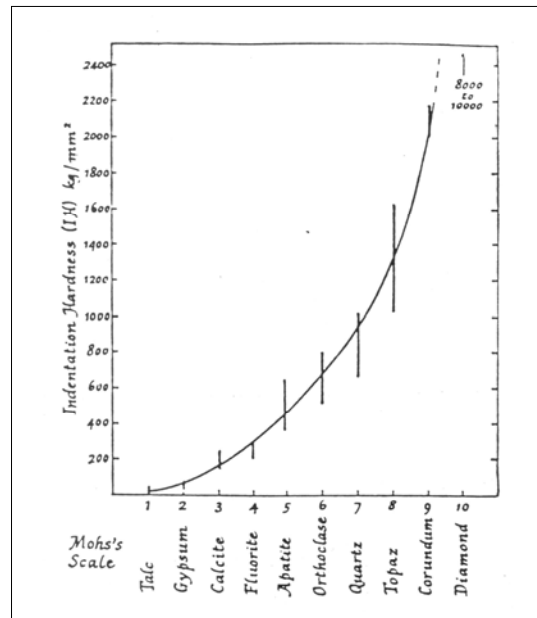
Figuur 15: Schematische weergave van de rangschikking van de  $(SiO_4)^{4-}$  -tetraëders in de neso-, soro-, cyclo-, ino-, fylo- en tectosilicaten.  
Bron: Hurlbut & Klein. *Manual of Mineralogy* (1999)



## Hardheid

De hardheid van een mineraal beschrijft de weerstand van het mineraal tegen mechanische belasting. Er zijn diverse technieken om de absolute hardheid van een mineraal te bepalen. Tijdens macroscopisch onderzoek wordt de relatieve hardheid bepaald: een mineraal dat harder is dan een ander mineraal zal in dit zachtere mineraal een kras kunnen maken. Er wordt gebruik gemaakt van een referentieschaal die is opgesteld door de heer Mohs: de hardheidsschaal van Mohs.

Hardheid	1	talk
	2	gips
	3	calciet
	4	fluoriet
	5	apatiet
	6	orthoklaas
	7	kwarts
	8	topaas
	9	korund
	10	diamant



Figuur 16: de relatieve hardheidsschaal van Mohs afgezet tegen een absolute hardheid

Tijdens het practicum wordt deze referentieset niet gebruikt maar wel simpele hulpmiddelen die iedereen altijd gemakkelijk voorhanden heeft:

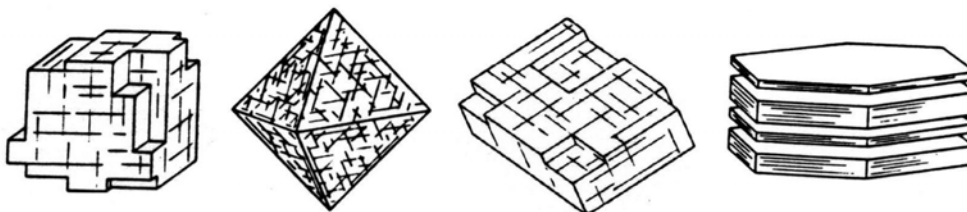
- Hardheid: 2 – 2.5 vingernagel  
 3 – 3.5 muntstuk van € 0.05  
 ± 5.5 glas of het lemmet van een mes

## Splijting (cleavage)

Binnen de kristallijne opbouw van een mineraal zijn vaak zwakke bindingen in een regelmatig weerkerend patroon aanwezig, zij vormen vlakken binnen de structuur. Tijdens mechanische belasting zal het mineraal via deze zwakkere vlakken breken, splijten. Het mineraal kan in dit geval geheel of gedeeltelijk begrensd worden door splijtvlakken (niet te verwarren met kristalvlakken!). Door mechanische belasting kan het mineraal langs deze splijtvlakken breken maar de splijtvlakken kunnen zich ook binnen het kristal ontwikkelen zonder dat het mineraal daadwerkelijk breekt. Er ontstaat binnen het mineraal een regelmatig patroon van kleine barstjes: het mineraal vertoont 'splijting'. Een mineraal kan meerdere splijtrichtingen hebben. Vaak kan een mineraal of een mineraalgroep aan zijn splijting herkend worden.

Let op: voor de ontwikkeling van splijting is mechanische belasting nodig. Dat wil zeggen dat de eigenschap splijting wel tot het kenmerk van het mineraal kan behoren maar niet zichtbaar hoeft te zijn doordat de mechanische belasting niet (in voldoende mate) heeft plaatsgevonden.

Enkele voorbeelden:



Figuur 17: Enkele voorbeelden van mineralen met splijting

## **Breuk**

Als een mineraal tijdens mechanische belasting niet via vlakken met zwakke bindingen breekt ontstaan onregelmatige breukvlakken in het mineraal. Dit wordt 'breuk' genoemd. Deze breukvlakken hebben geen kristallografisch bepaalde richting binnen het mineraal en hebben vaak een ruw oppervlak waarop licht minder mooi gereflecteerd wordt. Sommige mineralen hebben helemaal geen zwakke bindingen binnen het kristalrooster en ontwikkelen nooit slijtvlakken maar alleen breukvlakken. Kwarts is een voorbeeld van een mineraal zonder slijting. Soms hebben breukvlakken die zich in kwarts ontwikkelen een schelpvormig uiterlijk, dit wordt een schelpvormige of conchoïdale breuk genoemd.

## **Vervormbaarheid**

Ook dit is een eigenschap die de reactie van het mineraal op mechanische belasting beschrijft. De volgende termen worden gebruikt:

Bros	het mineraal breekt
Pletbaar	het mineraal vervormt blijvend
Snijdbaar	het mineraal kan in delen gesneden worden
Rekbaar	het mineraal kan in draden getrokken worden
Flexibel	het mineraal kan verbogen worden maar veert niet terug
Elastisch	het mineraal kan verbogen worden maar veert wel terug.

## **Kleur**

Dit is een eigenschap die voortkomt uit de interactie tussen mineraal en licht. De kleur van een mineraal wordt meestal veroorzaakt door de absorptie van bepaalde golflengtes uit het zichtbare licht door elektronen in de buitenste schillen van de ionen of atomen. Golflengtes die niet geabsorbeerd worden geven een resulterende kleur. Daarnaast kunnen bepaalde elementen een specifieke kleur opleveren. Koper bijvoorbeeld geeft aan mineralen een blauwe, groene of rode kleur. IJzer geeft mineralen vaak een groene, rode, oranje of gele kleur.

De kleur van een mineraal kan beïnvloed worden door toevalsfactoren waardoor de eigenschap kleur een onbetrouwbaar determinatiekenmerk wordt. Factoren die de kleur kunnen beïnvloeden zijn onder andere: onzuiverheden ('vervuiling'), defecten in het rooster en oppervlakteverschijnselen (reactie met de atmosfeer geeft een dun laagje met afwijkende kleuren, zogenaamde 'aanloopkleuren').

## **Streep**

Ook deze eigenschap komt voort uit de interactie tussen mineraal en licht en is verwant aan de eigenschap kleur. De streep(kleur) van een mineraal geeft de kleur van het mineraal in poedervorm. Deze informatie wordt verkregen door met een vers stuk van het mineraal een streep te zetten op een ongeglazuurd wit porseleinen plaatje ('streepplaatje'). De kleur die op het streepplaatje wordt achtergelaten wordt de 'streep' van het mineraal genoemd. In tegenstelling tot de kleur van een mineraal is de streep constant van kleur en is dus een belangrijke bron van informatie.

Let op: de streepplaatjes die tijdens het practicum gebruikt worden hebben een hardheid tussen 6 en 6.5. Als een streep wordt gezet met een mineraal dat harder is dan het streepplaatje, harder dus dan 6.5, verpoedert niet het mineraal maar het streepplaatje tijdens het zetten van de streep. De streep geeft dan informatie over de streep(kleur) van het streepplaatje en niet over die van het mineraal!

## **Luminescentie, fluorescentie, fosforescentie**

Deze eigenschappen zijn eveneens het gevolg van interactie tussen mineralen en licht. Als een mineraal bestraald wordt met licht van een bepaalde golflengte kan het zelf ook licht gaan uitzenden, meestal met een langere golflengte. Door de bestraling absorbeert het mineraal fotonen waardoor elektronen in een 'aangeslagen' toestand belanden, ze gaan naar een hogere baan dus. De elektronen vallen terug naar hun eigenlijke baan onder uitzending van energie in de vorm van golflengtes met een langere golflengte. In het algemeen wordt deze eigenschap luminescentie genoemd. Als het uitzenden van energie ophoudt zodra de bestraling wordt stopgezet wordt dit 'fluorescentie' genoemd. Als het mineraal de geabsorbeerde energie kan opslaan en ook nog energie kan uitzenden na stopzetting van de bestraling wordt dit 'fosforescentie' genoemd. Bij het onderzoek van mineralen wordt vaak naar de fluorescerende eigenschappen gekeken en wel door de mineralen te bestralen met UV-licht. Sommige mineralen zenden vervolgens energie uit als golflengtes die vallen binnen het zichtbare licht. Afhankelijk van de combinatie van aanwezige golflengtes laten deze mineralen soms fraaie kleuren zien.

## Glans

Deze eigenschap geeft aan hoe het oppervlak van een mineraal reageert op opvallend licht. De glans is afhankelijk van de absorptieindex en de brekingsindex van het mineraal. Er worden twee hoofdtypen glans onderscheiden:

Metaalglans: mineralen met een metaalglans absorberen veel licht en licht dat niet wordt geabsorbeerd wordt gereflecteerd. Mineralen waarin de metaalbinding een belangrijke rol speelt vertonen doorgaans een metaalglans. Ook mineralen met covalente bindingen kunnen een metaalglans hebben.

Niet-metaal glans: Hiertoe behoren diverse typen glans, zoals bijvoorbeeld:

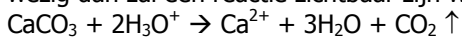
Glasglans: het mineraal glanst als glas  
Vetglans: het mineraal glanst als boter  
Zijdeglans: het mineraal glanst als boter  
Parelmoerglans: het mineraal glanst als glas  
Diamantglans: het mineraal schittert als een diamant

## Magnetische eigenschappen

Verskillende magnetische eigenschappen kunnen bij mineralen onderscheiden worden zoals diamagnetisme, paramagnetisme, ferromagnetisme, anti-ferromagnetisme en ferrimagnetisme. Tijdens het practicum is het van belang vast te kunnen stellen of een mineraal al dan niet ferrimagnetisch is. Dit wordt vastgesteld door te onderzoeken of een mineraal al dan niet een kompasnaald van richting kan doen veranderen.

## Chemische eigenschappen

Mineralen zijn chemische verbindingen en zijn dus met behulp van chemische reacties aan te tonen. Een simpel chemisch testje om de aanwezigheid van  $\text{CaCO}_3$  aan te tonen wordt veel toegepast. Tijdens dit testje wordt een druppel verdund zoutzuur (circa 10% of 1 normaal) op het mineraal gedruppeld. Is  $\text{CaCO}_3$  aanwezig dan zal een reactie zichtbaar zijn waarbij  $\text{CO}_2$  vrijkomt:



## Overige eigenschappen

Eigenschappen als piezo-elektrisch of pyro-elektrisch gedrag vallen buiten het bereik van dit vak. Ook de radioactiviteit van mineralen wordt niet besproken, in de practicumcollectie zijn geen radioactieve mineralen aanwezig.

## 4.4. Practicum mineralogie (inclusief mineraalbeschrijvingen)

Oefening 1: het leren herkennen van fysische eigenschappen van mineralen

Voor deze oefening worden geen fraaie voorbeelden gebruikt maar wel voorbeelden die heel geschikt zijn voor het herkennen van de streep en waar goed de hardheid mee uitgetest kan worden.

Oefening 2: het bestuderen van geselecteerde mineralen.

Dit zijn de mineralen die je voor het tentamen moet kennen. Van elk mineraal zijn verschillende voorbeelden aanwezig en van de meeste zijn ook houten kristalmodellen aanwezig die kunnen helpen bij het herkennen van de kristalvorm. Het is de bedoeling de mineralen zodanig te bestuderen dat je na afloop in staat bent om mineralen zonder naamkaartje erbij te determineren. Tijdens het tentamen moet je dat ook kunnen zonder dat je boeken tot je beschikking hebt. Het is niet zinvol alle fysische eigenschappen van alle mineralen uit het hoofd te leren. Vaak is een combinatie van een paar eigenschappen al karakteristiek voor een mineraal, het is zaak om die karakteristieke combinatie te ontdekken en te onthouden. De geselecteerde mineralen zijn vooral gesteentevormende mineralen. Daarnaast zijn enkele belangrijke ertsmineralen in de collectie aanwezig. De beschrijvingen van de mineralen zijn te vinden op de bladzijden 41 t/m 53.

Oefening 3: er is een collectie aanwezig waarin dezelfde mineralen aanwezig zijn, nu echter zonder naamkaartje en in een willekeurige volgorde. Met behulp van deze 'blinde collectie' kan de opgedane kennis getest worden.

### Het tentamen ta1900-deel 3: onderdeel mineralogie

Tijdens het tentamen zullen mineralen uit onderstaande lijst getentamineerd worden. Je krijgt 10 mineralen waarvan de naam en de chemische formule gevraagd worden. Dit is een 'gesloten boek' tentamen. Het tentamen wordt gecombineerd met de analyse van drie kristalmodellen. Een voorbeeld van het tentamenformulier bevindt zich op bladzijde 6.

Blz.	<b>NIET-SILICATEN:</b>	Blz.	<b>SILICATEN:</b>
	<b>Sulfiden:</b>		<b>Nesosilicaten:</b>
41	Chalcopyriet $\text{CuFeS}_2$	44	Olivijn $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$
41	Sfaleriet $\text{ZnS}$	45	Granaat $\text{R}_3\text{R}_2(\text{SiO}_4)_3$
41	Galeniet $\text{PbS}$	45	Andalusiet $\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
41	Pyriet $\text{FeS}_2$	46	Kyaniet $\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
	<b>(Hydr)oxiden:</b>	46	Sillimaniet $\text{Al}_2\text{OSiO}_4$
42	Magnetiet $\text{Fe}_3\text{O}_4$	46	Stauroliet $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O,OH})_2$
42	Hematiet $\text{Fe}_2\text{O}_3$		<b>Overgang neso-sorosilicaten:</b>
42	Goethiet $\text{FeO}(\text{OH})$	46	Epidoot $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$
	<b>Carbonaten:</b>		<b>Inosilicaten:</b>
43	Calciet $\text{CaCO}_3$	47	Augiet $(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe,Al})\{(\text{Si,Al})_2\text{O}_6\}$
43	Sideriet $\text{FeCO}_3$	48	Hoornblend $(\text{Na,Ca})_{2-3}(\text{Mg,Fe,Al})_5\{(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}\}(\text{OH})_2$
43	Dolomiet $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	48	Actinoliet $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
	<b>Sulfaten, fosfaten:</b>	48	Glaucofaan $\text{Na}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$
44	Bariet $\text{BaSO}_4$		<b>Fyllosilicaten:</b>
44	Apatiet $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH}))$	49	Muscoviet $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
		49	Biotiet $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
		50	Chloriet $(\text{Mg,Al,Fe})_{12}\{(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}\}(\text{OH})_{16}$
		50	Kaoliniet $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
		50	Illiet $\text{KAl}_4(\text{Si}_7\text{AlO}_{20})(\text{OH})_4$
		51	Glauconiet       verwant aan illiet
		51	Montmorilloniet $(\text{Al,Mg})_4\{(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}\}(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}$
			<b>Tectosilicaten:</b>
		51	Kwarts $\text{SiO}_2$
		52	Chalcedoon $\text{SiO}_2$
		52	Opaal $\text{SiO}_2.n\text{H}_2\text{O}$
		53	Nefelien $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
		53	Leuciet $\text{K}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$
		54	Microklien $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
		54	Orthoklaas $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
		55	Sanidien $(\text{K,Na})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
		55	Albiet $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
		55	Anorthiet $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

De figuren van de kristalvormen die bij de mineraalbeschrijvingen zijn opgenomen zijn afkomstig uit verschillende boeken. Het merendeel komt uit:  
 Hurlbut & Klein. Manual of Mineralogy (2002)  
 Battey. Mineralogy for students (1981)

**CHALCOPYRIET**CuFeS<sub>2</sub>

Kristalvorm: T:  $\bar{4}2m$   
 Kleur: messinggeel  
 Streep: zwart met een lichtgroene zweem  
 Glans: metaalglans  
 Hardheid: 3.5 - 4  
 Splijting: -  
 s.g.: 4.1 - 4.3



Bijzonderheden: De kleur van het mineraal kan 'vedoezeld' zijn door aanloopkleuren. Dit kunnen diverse tinten zijn; vaak zijn blauwe, paarse, gele of oranje tinten aanwezig. Het mineraal vormt zelden kristallen.

Voorkomen: Primair kopererts; in hydrothermale afzettingen, porfierische koperafzettingen, e.a.

Toepassing: Bron voor koper

**SFALERIET**

ZnS

Kristalvorm: K:  $\bar{4}3m$   
 Kleur: licht honinggeel tot bruinzwart  
 Streep: lichtgeel tot donkergeel  
 Glans: diamantglans  
 Hardheid: 3.5 - 4  
 Splijting: {111}: perfect  
 s.g.: 4.6 - 4.7



Bijzonderheden: De karakteristieke kristallen ontstaan zelden. Sfaleriet is goed herkenbaar aan zijn hoge glans en duidelijke splijting. Soms is bij het maken van de streep een duidelijke H<sub>2</sub>S-lucht waarneembaar. Een deel van de Zn kan vervangen worden door Fe. Het Fe-gehalte bepaalt de kleur van het mineraal: hoe meer Fe des te donkerder de kleur en zijn streep.

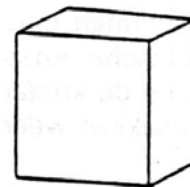
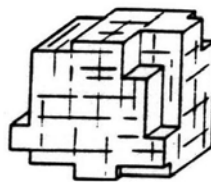
Voorkomen: Voornamelijk in hydrothermale gangen, vaak samen met galeniet.

Toepassing: Zinkerts

**GALENIET**

PbS

Kristalvorm: K:  $4/m\bar{3}2/m$   
 Kleur: loodgrijs  
 Streep: loodgrijs  
 Glans: metaalglans  
 Hardheid: 2.5  
 Splijting: {001}: perfect  
 s.g.: 7.4 - 7.6



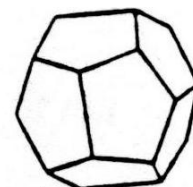
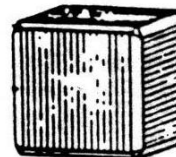
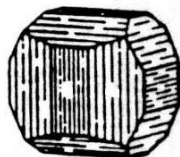
Bijzonderheden: Opaak, zwaar mineraal. Vaak mooie kristallen met de karakteristieke goed ontwikkelde splijting

Voorkomen: Voornamelijk in hydrothermale gangen, vaak samen met sfaleriet.

Toepassing: Looderts

**PYRIET**FeS<sub>2</sub>

Kristalvorm:  $2/m\bar{3}$   
 Kleur: messinggeel  
 Streep: bruinzwart  
 Glans: metaalglans



Hardheid: 6 – 6.5  
Splijting: -  
s.g.: 5

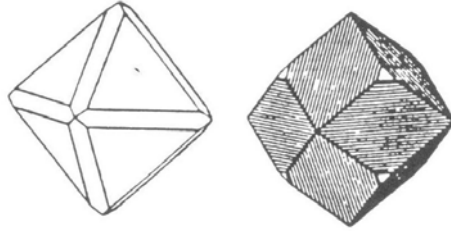
Bijzonderheden: Schelpvormige breuk. Vaak euhedrische kristallen. Algemeen zijn de hexaëder {100} en de pentagondodecaëder {210}. Door de afwisselende groei van de hexaëder- en pentagondodecaëdervlakken is op de kristalvlakken vaak een fijne streping aanwezig. Deze streping verlaagt de symmetrie. Pyriet wordt wel eens voor goud aangezien vandaar zijn bijnaam 'fool's gold' of 'gekkengoud'.

Voorkomen: Zeer algemeen mineraal  
Toepassing: Het mineraal werd vroeger gebruikt als ijzer- en/of zwavelerts.

### **MAGNETIET**

$\text{Fe}_3\text{O}_4$

Kristalvorm: K:  $4/m\bar{3}2/m$   
Kleur: loodzwart tot zwart  
Streep: zwart  
Glans: metaalglans  
Hardheid: 5.5 - 6  
Splijting: -  
s.g.: 5.2



Bijzonderheden: Magnetisch mineraal. Indien een deel van de Fe echter vervangen is door Mn, Ti ed. kan het magnetisme zo goed als afwezig zijn. Het mineraal kan massieve massa's vormen, soms ontstaan mooie euhedrische octaëdrische of dodecaëdrische kristallen. De intersectie van de octaëder- en dodecaëdervlakken geeft een fijne streping op de kristalvlakken, dit is m.a.w. een groei-effect en geen splijting

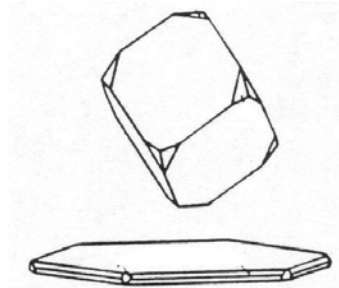
Voorkomen: Zeer algemeen accessorisch mineraal. Grote concentraties komen vooral voor in mafische magmatische gesteenten

Toepassing: Belangrijk ijzererts

### **HEMATIET**

$\text{Fe}_2\text{O}_3$

Kristalvorm: Tr:  $\bar{3}2/m$   
Kleur: bloedrood tot zwart  
Streep: rood tot roodbruin  
Glans: (sub)metaalglans  
Hardheid: 5.5 – 6.5  
Splijting: -  
s.g.: 5.3



Bijzonderheden: De vorm van de kristallen varieert: plaatvormig evenwijdig aan {0001} tot naaldvormig. Ook komen botryoidale ('druiventrosachtige') vormen voor, als de buitenkant mooi glimt spreekt men ook wel van 'glaskophematiet'.

Voorkomen: Zeer algemeen mineraal; de belangrijkste afzettingen zijn sedimentair  
Toepassing: belangrijk ijzererts

### **GOETHIET**

$\text{FeO}(\text{OH})$

Kristalvorm: O:  $2/m2/m2/m$   
Kleur: geelbruin, oranjebruin tot bruin  
Streep: geelbruin  
Glans: diamantglans  
Hardheid: 5 – 5.5  
Splijting: {010}: perfect  
s.g.: 4.4

Bijzonderheden: Mooie kristallen met een diamantglans zijn zeer zeldzaam. Vaker ontstaan aardachtige massa's met een doffe glans. Het mineraal kan ook fijnkristallijne overkorstingen vormen.

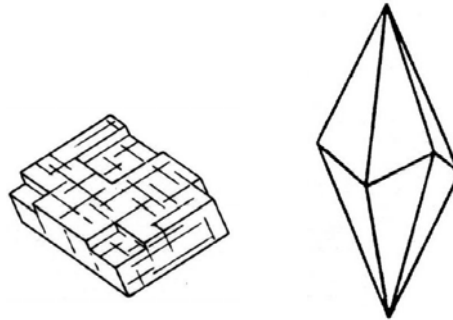
Voorkomen: Zeer algemeen secundair mineraal dat ontstaat onder oxiderende omstandigheden door verwerking van ijzerhoudende mineralen

Toepassing: ijzererts

**CALCIET**



Kristalvorm: Tr:  $\bar{3}2/m$   
 Kleur: meestal wit of beige  
 Streep: wit  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 3  
 Spletting:  $\{10\bar{1}1\}$ : perfect  
 s.g.: 2.7



Bijzonderheden: Het uiterlijk van de kristallen is zeer variabel: de kristallen kunnen zeer plat (korte C-as) tot zeer langgerekt (lange C-as) zijn. De spletting van calciet is perfect en zeer karakteristiek. Vormen die door spletvlakken omgeven worden zien eruit als 'scheefgedrukte luciferdoosjes', deze spletthomboeders zijn zeer karakteristiek. Calciet reageert met verdund zoutzuur. De kleur is variabel: ook kleurloos, rood, blauw, groen.

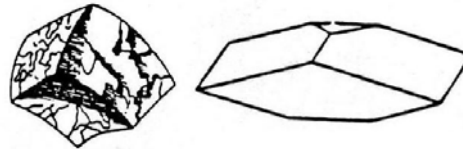
Voorkomen: Calciet is een zeer algemeen mineraal, belangrijk mineraal in kalksteen en marmer.

Toepassing: zie bij de beschrijving van dolomiet

**SIDERIET**



Kristalvorm: Tr:  $\bar{3}2/m$   
 Kleur: licht- tot donkerbruin  
 Streep: lichtbruin, soms donkerbruin  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 3.5 - 4  
 Spletting:  $\{10\bar{1}1\}$ : perfect  
 s.g.: 2.7

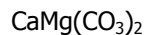


Bijzonderheden: De kristallen zijn vaak rhomboeders. Opvallend is dat de kristalvlakken en de spletvlakken vaak niet geheel vlak zijn maar licht 'gekromd' zijn. Soms zijn de kristallen plaatvormig en vormen zij rozetten.

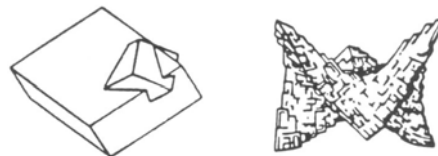
Voorkomen: In hydrothermale gangen en in sedimentaire gesteenten.

Toepassing: -

**DOLOMIET**



Kristalvorm: Tr:  $\bar{3}$   
 Kleur: wit tot lichtbruin, soms roze  
 Streep: wit tot lichtbruin  
 Glans: glasglans, soms diamantglans  
 Hardheid: 3.5 - 4  
 Spletting:  $\{10\bar{1}1\}$ : perfect  
 s.g.: 2.8



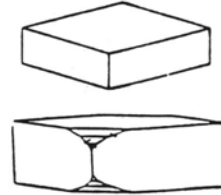
Bijzonderheden: Als kristalvorm zijn vaak rhomboeders aanwezig. Opvallend is dat de kristal- en spletvlakken vaak een lichte kromming laten zien (sideriet laat dit verschijnsel ook zien). De kristallen zijn meestal klein en bevinden zich in korrelige, suikerachtige en vaak poreuze aggregaten. Dolomiet reageert niet met verdund zoutzuur.

Voorkomen:	Dolomiet ontstaat soms primair in hydrothermale gangen. De meeste dolomiet ontstaat secundair door een gedeeltelijke vervanging van Ca door Mg in calciet in kalksteen; dit proces wordt 'dolomitatie' genoemd.
Toepassing:	Calciet en dolomiet zijn de belangrijkste mineralen in kalksteen en marmer. Deze gesteenten worden gebruikt als bouwsteen en als toeslagmateriaal in beton, asfalt ed. Tevens zijn deze gesteenten de belangrijkste grondstoffen voor (gebrande) 'kalk', dat vele toepassingen heeft: flux in de staal- en glasindustrie, cement, kunstmest, insecticiden, verf, tandpasta, rubber, plastic, etc. gezien het basische karakter van kalk wordt het tevens gebruikt voor ontzuringdoeleinden.

### **BARIET**

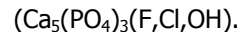


Kristalvorm:	O: 2/m2/m2/m
Kleur:	wit, soms met en grijze, bruine of roze tint
Streep:	wit
Glans:	glas- tot parelmoerglans
Hardheid:	3 – 3.5
Splijting:	{001}: perfect; {210}: duidelijk
s.g.:	4.5

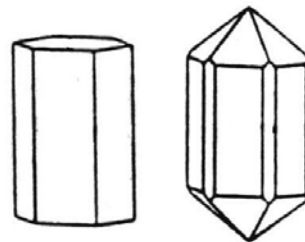


Bijzonderheden:	De kristallen zijn plaatvormig, soms in nestvormige aggregaten.
Voorkomen:	Voorname in hydrothermale gangen maar ook in sedimentaire gesteenten
Toepassing:	Bariet is, met sfaleriet, de belangrijkste component in lithopone verf (witte, dekkende verf). Andere toepassingen: rubber, glas, linoleum, papier, plastic, harsen, speelkaarten, buttons, cosmetische producten e.a. Zeer belangrijk is het gebruik van bariet tijdens de olie- en gasexploratie. Gemalen bariet wordt toegevoegd aan boorspoelingen. Het doet hierin dienst als smeermiddel: het dicht de wanden van het boorgat. Door zijn hoge s.g. zorgt het er tevens voor dat de olie- en gasdruk op grote diepte behouden blijft waardoor blow-outs voorkomen worden. Zwaardere voorwerpen die in het boorgat zijn achtergebleven kunnen met de boorspoeling weer mee omhoog komen.

### **APATIET**

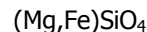


Kristalvorm:	H: 6/m
Kleur:	variabel: groen, blauw, paars, wit
Streep:	wit
Glans:	glasglans tot vetglans
Hardheid:	5
Splijting:	{0001}: zwak
s.g.:	3.2



Bijzonderheden:	Zelden duidelijke kristallen. In massieve apatiet is soms een fijn barstenpatroon aanwezig dat qua structuur lijkt op de structuur van gebroken autoglas.
Voorkomen:	Het is een accessorisch mineraal in alle typen gesteenten. Hoge concentraties kunnen voorkomen in gangen maar ook in sedimentaire gesteenten. Apatiet is tevens een belangrijk bestanddeel van botten en tanden. Ook uitwerpselen van organismen kunnen zeer rijk zijn aan apatietvariëteiten, accumulaties hiervan worden 'guano' afzettingen genoemd.
Toepassing:	Belangrijkste bron voor fosfaat, grondstof voor kunstmest.

### **OLIVIJN**



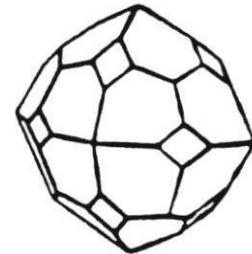
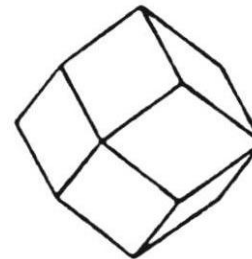
Kristalvorm:	O: 2/m2/m2/m
Kleur:	lichtgroen, olijfgroen, olijfbuin
Streep:	-
Glans:	glasglans



Hardheid:	6.5 - 7
Splijting:	{001}: zwak; ook: schelpvormige breuk
s.g.:	3.2 – 4.4: afhankelijk van Fe-gehalte
Bijzonderheden:	Nesosilicaat. In relatief fijnkristallijne dieptegesteenten of als fenokristen in bazalt en bazaltachtige gesteenten
Voorkomen:	Mafische en ultramafische gesteenten
Toepassing:	Veel toepassingen. Traditioneel wordt olivijnzand onder andere gebruikt voor de fabricage van gietvormen voor bijvoorbeeld de staalindustrie ('foundry sands'), als vervanger voor kwartzsand tijdens zandstralen en voor de fabricage van vuurvaste materialen. Tegenwoordig wordt olivijn tevens gebruikt als reagens om slakvorming tijdens de staal- en ijzerfabricage beter te laten verlopen. Een mogelijke nieuwe toepassing: reductie van het CO <sub>2</sub> -gehalte in de lucht door olivijn te laten reageren met CO <sub>2</sub> (er ontstaat serpentijn).

### GRANAATgroep

Al-granaten:	pyroop	Mg <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	donkerrood
	almandien	Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	donkerrood
	spessartien	Mn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	rood tot bruin
	e.a.		
Ca-granaten:	uwarowiet	Ca <sub>3</sub> Cr <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	gifgroen
	grossulaar	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	meestal groen
	andradiet	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	bruin
	e.a.		

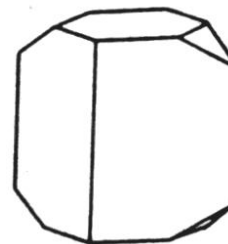


Kristalvorm:	4/m $\bar{3}2/m$
Kleur:	variabel, zie boven
Streep:	-
Glans:	glasglans tot vetglans
Hardheid:	6.5 - 8
Splijting:	-
s.g.:	3.5 – 4.3

Bijzonderheden:	Nesosilicaat. Vaak mooie euhedrische rhombendodecaëders {110}.
Voorkomen:	Granaten zijn zeer algemeen in metamorfe gesteenten, vaak is dit almandien. Tijdens metamorfose van kalksteen kan grossulaar of andradiet ontstaan. Pyropen kunnen in de mantel in mafische magmatische gesteenten ontstaan, of in de metamorfe equivalenten hiervan. Sporadisch worden granaten aangetroffen in pegmatieten en vulkanische gesteenten.
Toepassing:	Mooi gekleurde granaten worden als edelsteen verwerkt. De hardheid van het mineraal samen met een gebrek aan splijting maken het mineraal geschikt voor verwerking in abrasieve producten zoals in 'granaatpapier', een soort schuurpapier

### ANDALUSIET

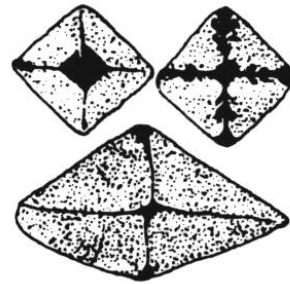
	Al <sub>2</sub> OSiO <sub>4</sub>
Kristalvorm:	O: 2/m2/m2/m
Kleur:	variabel: grijszwart à –bruin, ook roze
Streep:	-
Glans:	glasglans
Hardheid:	7.5
Splijting:	{110}: goed, {100}: zwak
s.g.:	3.2



Bijzonderheden:	Nesosilicaat. Polymorf van kyaniet en sillimaniet. Zie ook blz. 46 voor chiastoliet.
-----------------	--

Voorkomen:  
Toepassing:

De laag metamorfe variëteit 'chiastoliet' heeft opake insluitsels die in een regelmatig kruisvormig patroon gerangschikt kunnen zijn.  
Metamorfe gesteenten  
-



### KYANIET

$\text{Al}_2\text{OSiO}_4$

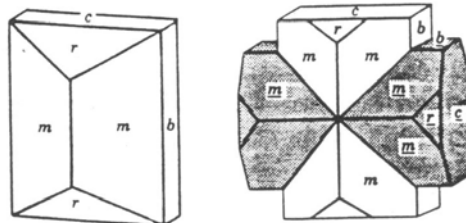
Kristalvorm: Trik:  $\bar{1}$   
Kleur: wit tot hemelsblauw  
Streep: wit tot lichtblauw  
Glans: glasglans tot parelmoerglans  
Hardheid: parallel aan de lengterichting: 5  
loodrecht op de lengterichting: 7  
Splijting:  $\{100\}$ : perfect,  $\{010\}$ : goed  
s.g.: 3.6

Bijzonderheden: Nesosilicaat. Polymorf van andalusiet en sillimaniet.  
Wordt ook distheen (betekent: '2 hardheden') genoemd.  
Voorkomen: metamorfe gesteenten  
Toepassing: -

### STAUROLIET

$\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O},\text{OH})_2$

Kristalvorm: M: 2/m, pseudo-orthorhombisch  
Kleur: roodbruin tot diepzwart  
Streep: -  
Glans: vetglans tot glasglans  
Hardheid: 7 - 7.5  
Splijting:  $\{010\}$ : middelmatig  
s.g.: 3.6

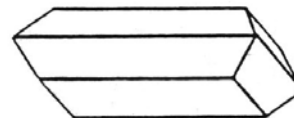


Bijzonderheden: Nesosilicaat. Het mineraal vorm regelmatig tweelingen, dit worden wel 'ijzeren kruis' tweelingen genoemd.  
Voorkomen: Metamorfe gesteenten, vaak samen met kyaniet.  
Toepassing: -

### EPIDOOT

$\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})\text{Al}_2\text{O}(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})$

Kristalvorm: M: 2/m  
Kleur: pistachegroen tot zeer donkergroen  
Streep: -  
Glans: vetglans tot glasglans  
Hardheid: 6 - 7  
Splijting:  $\{001\}$ : perfect,  $\{100\}$ : middelmatig  
s.g.: 3.2 - 3.5



Bijzonderheden: De structuur van epidoot is een overgangsvorm tussen die van neso- en sorosilicaten. Epidoot vormt kristallen die langgerekt zijn volgens de B-as. Streping parallel aan de B-as  
Voorkomen: Metamorfe gesteenten, vaak samen met actinoliet en chloriet.  
Toepassing: -

## PYROXEENGROEP

Tot de pyroxeengroep behoren mineralen met de algemene formule  $XY(Si_2O_6)$ . Pyroxenen zijn inosilicaten. De kristalstructuur wordt opgebouwd uit  $SiO_4$ -tetraëders die enkele ketens parallel aan de C-as vormen. De ketens worden door lagen kationen met elkaar verbonden. De chemie is variabel, de volgende substituties zijn mogelijk:

X: Na, Ca, Mn,  $Fe^{2+}$ , Mg, Li;

Y: Mn,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Mg, Al, Cr, Ti

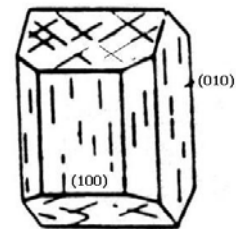
Si: Si kan deels vervangen worden door Al

De pyroxenen worden onderverdeeld in orthopyroxenen,  $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ , en clinopyroxenen,  $(Ca,Mg,Fe)_2Si_2O_6$ . Orthopyroxenen: de kationen zijn even groot waardoor deze pyroxenen een orthorhombische symmetrie hebben. Vandaar het voorvoegsel 'ortho'. Orthopyroxenen zijn zeldzamer dan clinopyroxenen, zij komen vooral voor in (ultra)mafische magmatische gesteenten.

Clinopyroxenen: de kationen zijn niet even groot waardoor deze pyroxenen een monokliene symmetrie hebben. Vandaar het voorvoegsel 'clino'. Clinopyroxenen zijn vrij algemeen, zij komen veelvuldig voor in basische magmatische gesteenten. Augiet is de belangrijkste clinopyroxeen, deze wordt hieronder apart beschreven.

**AUGIET**  $(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)\{Si,Al\}_2O_6$

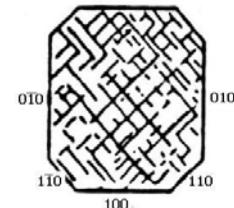
Kristalvorm: M: 2/m  
 Kleur: donkergroen tot (bruin)zwart, meestal zwart  
 Streep: wit tot bruinig  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 5 - 6  
 Spletting:  $\{110\}$ : goed  
 s.g.: 3.2 - 3.3



Bijzonderheden: De kristallen zijn over het algemeen kort prismatisch. De spletting maakt onderscheid met amfibolen mogelijk: Op de kopse kant van de kristallen zijn soms 2 richtingen zien, deze maken hoeken van  $90^\circ$  met elkaar.

Voorkomen: Basische magmatische gesteenten

Toepassing: -



## AMFIBOOLGROEP

Tot de amfiboolgroep behoren mineralen met de algemene formule  $X_{2-3}Y_5(Si_8O_{22})(OH)_2$ . Amfibolen zijn inosilicaten. De kristalstructuur wordt opgebouwd uit  $SiO_4$ -tetraëders die dubbele ketens parallel aan de C-as vormen. De eenheden die uit dubbele ketens bestaan worden door lagen kationen met elkaar verbonden. De chemie is variabel, de volgende substituties zijn mogelijk:

X: Na, K, Ca, Mn,  $Fe^{2+}$ , Mg

Y: Mg,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Al, Cr, Ti, Mn, Li, Zn

Si: Si kan deels vervangen worden door Al

Tot de amfiboolgroep behoren onder andere:

	X:	Y:	
Mg-Fe amfibolen	$(Mg,Fe)_2$	$(Mg,Fe)_5$	anthofylliet-cummingtoniet
Ca-amfibolen	$Ca_2$	$(Mg,Fe)_5$	tremoliet-aktinoliet
	$NaCa_2$	$(Mg,Fe,Al)_5$	hoornblende
Na-amfibolen	$Na_2$	$(Mg,Fe,Al)_5$	glaucofaan, riebeckiet

Deze formules zijn sterk vereenvoudigd, vooral op de Y-plaats kunnen veel meer substituties optreden. Enkele Mg-Fe amfibolen kristalliseren uit in het orthorhombische stelsel, dit worden ortho-amfibolen genoemd; de meeste amfibolen zijn echter clino-amfibolen, monokliene amfibolen.

Actinoliet, hoornblende en glaucofaan worden apart besproken.

Commerciële toepassingen van amfibolen beperken zich voornamelijk tot de asbestvormende variëteiten zoals anthofyllietasbest, grunerietasbest (amosiet), en riebeckietasbest (crocidoliet of 'blauwe asbest'). Asbest is een overkoepelende naam voor vezelige kristallen die 60 maal langer dan breed zijn, veel mineralen kunnen asbestueus zijn. Ook leden van de serpentijngroep kunnen lange vezelige kristallen krijgen ('witte asbest'). De meeste asbestvezels zijn zeer sterk, slijtvast, corrosiebestendig en resistent tegen hitte en elektriciteit. De vezels kunnen geweven worden tot dekenachtige materialen of ingebed worden in een matrix waardoor het gemakkelijk te verwerken is tot elke gewenste vorm. Elektrisch en thermisch isolatiemateriaal, wrijvingsbestendige producten (b.v. remschijven), vloer- en dakbedekkingen behoren tot de belangrijkste producten. Behoorden eigenlijk: gezien de gezondheidsproblemen die op kunnen treden na inademen van asbestdeeltjes (blauwe asbest!) is het gebruik van asbest niet langer toegestaan.

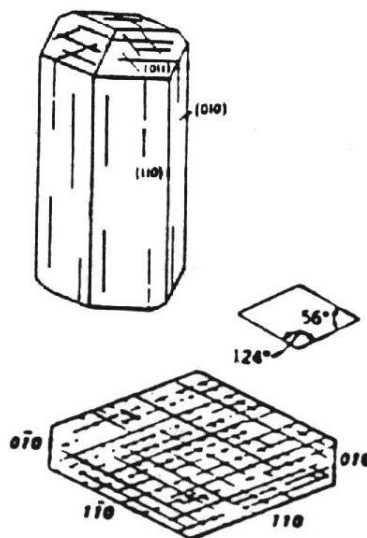
**HOORNBLLENDE**  $(\text{Na,Ca})_{2-3}(\text{Mg,Fe,Al})_5\{\text{(Si,Al)}_8\text{O}_{22}\}(\text{OH})_2$

Kristalvorm: M: 2/m  
 Kleur: donkergroen of -bruin, tot zwart  
 Streep: wit, soms licht groenig of -bruinig  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 5 - 6  
 Spleijting: {110}: perfect  
 s.g.: 3.0 - 3.4

Bijzonderheden: De kristallen zijn meestal lang prismatisch. De spleijting maakt onderscheid met pyroxenen mogelijk: op de kopse kant van de kristallen zijn 2 richtingen te zien, deze maken hoeken van 56° en 124° met elkaar.

Voorkomen: Hoornblende is een zeer algemeen mineraal in magmatische en metamorfe gesteenten.

Toepassing: -



**ACTINOLIET**  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$

Kristalvorm: M: 2/m  
 Kleur: heel lichtgroen tot donkergroen  
 Streep: wit tot lichtgroen  
 Glans: glasglans, vezelige kristallen hebben een zijdeglans  
 Hardheid: 5 - 6  
 Spleijting: {110}: perfect; zie tekening bij hoornblende  
 s.g.: 3.0 - 3.3

Bijzonderheden: actinoliet vormt een mengreeks met tremoliet,  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$ . Tremoliet is kleurloos, wit. Zodra er ijzer bijkomt wordt de kleur lichtgroen. Hoe meer ijzer des te donkerder de groene kleur. De lange prismatische kristallen groeien soms in radiaalstralige aggregaten: een in onbruik geraakte naam voor het mineraal is dan ook 'straalsteen'.

Voorkomen: In laagmetamorfe gesteenten, vaak samen met epidoot en chloriet

Toepassing: Nefriet is een actinolietvariëteit met fijne prismatische kristallen die gezamenlijk een taai maaksel vormen. Nefriet is één van de mineralen die als 'jade' verwerkt wordt.

**GLAUCOFAAN**  $\text{Na}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$

Kristalvorm: M: 2/m  
 Kleur: donkerblauw tot zwart; meestal grijszwart met een blauwe zweem  
 Streep: wit tot lichtblauw  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 6  
 Spleijting: {110}: perfect; zie tekening bij hoornblende

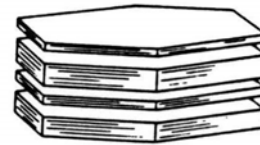
s.g.:	3.1 – 3.4
Bijzonderheden:	-
Voorkomen:	Glaucofaan is een mineraal dat karakteristiek is voor metamorfe gesteenten die in een subductiezone ontstaan zijn.
Toepassing:	-

### DE GLIMMER GROEP (MICA'S) EN DE CHLORIETGROEP

Glimmers en chloriet behoren tot de fyllosilicaten. De kristalstructuur bestaat uit laagsgewijs verbonden SiO<sub>4</sub>-tetraëders. Bij glimmers zijn deze SiO<sub>4</sub>-lagen zodanig gestapeld dat T-O-T-lagen ontstaan. T-O-T-lagen bestaan uit twee lagen tetraëders (T) waartussen een laag met octaëdergaten (O) aanwezig is. Deze T-O-T-eenheden worden door kationen met elkaar verbonden. De mineralen vormen plaatvormige kristallen. Het schilferige uiterlijk wordt versterkt door de perfecte splijting parallel aan {001}. De afzonderlijke blaadjes zijn zowel flexibel als elastisch. Euhedrische kristallen zijn vaak pseudo-hexagonaal. Muscoviet, biotiet en chloriet zijn belangrijke gesteentevormende mineralen. De chlorietgroep is sterk verwant aan de glimmergroep, ook deze groep heeft een T-O-T-opbouw. Deze wijze waarop deze eenheden met elkaar verbonden zijn wijkt iets af van de glimmerstructuur maar qua eigenschappen lijkt chloriet zeer op muscoviet en biotiet.

#### **MUSCOVIET** $KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$

Kristalvorm:	M: 2/m, pseudo-hexagonaal
Kleur:	kleurloos tot lichtgroen
Streep:	wit
Glans:	glasglans tot parelmoerglans
Hardheid:	2 – 2.5
Splijting:	{001}: perfect
s.g.:	2.7 – 2.9



Bijzonderheden:	Binnen de groep van de glimmers zijn een aantal aanwezig die op muscoviet lijken en moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn. Daarom worden zij vaak als 'kleurloze glimmers' beschreven omdat vaak niet duidelijk is met welke men te maken heeft.
Voorkomen:	Algemeen mineraal in zowel magmatische, metamorfe als sedimentaire gesteenten
Toepassing:	Muscoviet heeft eigenschappen waardoor het mineraal veel toepassingen heeft. Door de perfecte splijting kunnen dunne doorzichtige platen gemaakt worden. Deze zijn flexibel, resistent tegen hitte, elektriciteit en chemicaliën. Goede kwaliteit muscoviet wordt gebruikt als isolatiemateriaal in elektrische apparatuur (o.a. radio's en tv's), als hittebestendige ruitjes in bijvoorbeeld gasmaskers (vroeger: olie- en gas-kachels). Slechtere kwaliteit muscoviet wordt vermalen tot poeder. Dit poeder wordt verwerkt in hittebestendige materialen (o.a. kleding), als vulmiddel in rubber en plastic, als smeermiddel en als glans- en glittermiddel in behang en verf.

#### **BIOTIET** $K(Mg,Fe)_3(Si_3AlO_{10})(OH)_2$

Kristalvorm:	M: 2/m, pseudo-hexagonaal
Kleur:	lichtbruin tot donkerbruin à zwart
Streep:	wit tot bruin
Glans:	glasglans tot parelmoerglans
Hardheid:	2.5 - 3
Splijting:	{001}: perfect
s.g.:	2.8 – 3.2



Bijzonderheden:	Als alle Fe vervangen is door Mg wordt het mineraal 'flogopiet' genoemd.
Voorkomen:	zeer algemeen mineraal, als muscoviet
Toepassing:	Biotiet wordt vermalen tot biotietpoeder. Als poeder heeft het dezelfde toepassingen als muscoviet – zie aldaar. Flogopiet is een bijna kleurloos mineraal en heeft dezelfde eigenschappen als muscoviet. Grote kristallen worden als isolator gebruikt in elektrische apparaten. Flogopietpoeder wordt vaak in combinatie met biotiet- en/of muscovietpoeder gebruikt.

<b>CHLORIET</b>	$(\text{Mg,Al,Fe})_{12}\{\text{(Si,Al)}_8\text{O}_{20}\}(\text{OH})_{16}$
Kristalvorm:	M: 2/m
Kleur:	licht- tot donkergroen
Streep:	wit tot groen
Glans:	glas- tot parelmoerglans
Hardheid:	2 – 2.5
Splijting:	{001}: perfect
s.g.:	2.6 – 3.3
Bijzonderheden:	de kristallen blijven klein
Voorkomen:	Een algemeen mineraal in laagmetamorfe gesteenten
Toepassing:	-

## **KLEIMINERALEN**

Kleimineralen behoren tot de fyllosilicaten. De kristalstructuur bestaat uit laagsgewijs verbonden  $\text{SiO}_4$ -tetraëders. Enkele kleimineralen bestaan uit een opeenvolging van T-O-eenheden (voor uitleg zie bij glimmers). Anderen hebben een opbouw met T-O-T-eenheden met tussen deze eenheden kationen en/of water. Kleimineralen die gemakkelijk water kunnen opnemen en afstaan worden 'zwellende kleien' genoemd. Er bestaan veel verschillende kleimineralen die in de volgende groepen worden onderverdeeld: de kandietgroep (o.a. kaolinit), de illietgroep (o.a. illiet, glauconiet), de smectietgroep (o.a. montmorilloniet), vermiculiet en de palygorskietgroep. De mineralen kaolinit, illiet, glauconiet en montmorilloniet worden apart beschreven. Onderscheid maken tussen de diverse kleimineralen is vaak onmogelijk daar de mineralen op elkaar lijken en de kristallen erg klein blijven. Geavanceerde analysetechnieken moeten dan uitkomst brengen. Kleimineralen zijn belangrijke mineralen als gesproken wordt over hydrothermale omzettingprocessen en verweringsprocessen.

Kleimineralen hebben vele toepassingen. In de natuur ontstaan vaak verschillende kleimineralen op dezelfde plaats, ook bij gebruik van klei worden vaak mengsels gebruikt. Er vindt een onderverdeling naar de kwaliteit plaats: 'ball clay', 'fire clay', 'common clay', 'fuller's earth'. Afhankelijk van de kwaliteit wordt klei toegepast bij de fabricage van vuurvast materiaal, baksteen, dakpannen, cement, pijpen, etc. Goede kwaliteit klei wordt gebruikt voor de fabricage van aardewerk en porselein en kan dienst doen als vulmiddel in papier, rubber, plastic, etc.

<b>KAOLINIET</b>	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
Kristalvorm:	Trk: 1
Kleur:	wit, andere kleuren door onzuiverheden
Streep:	wit
Glans:	dof
Hardheid:	2
Splijting:	
s.g.:	2.6
Bijzonderheden:	Voornameijk aardachtige massa's. De naam kaolinit is afgeleid van 'kao lin', de naam van een berg in China waar de kaolinit ten behoeve van porselein ontgonnen werd.
Voorkomen:	Kaolinit ontstaat door verwerking onder zure omstandigheden van o.a. veldspaten en zure gesteenten
Toepassing:	Zie boven

**ILLIET**  $\text{KAl}_4(\text{Si}_7\text{AlO}_{20})(\text{OH})_4$

Geen voorbeelden aanwezig in de collectie. Illiet is zeer algemeen en bevindt zich in zeer veel kleimengsels. Het mineraal ontstaat door verwerking onder alkaline condities (veel Al en K) van veldspaten en glimmers. Gebruik: zie boven

## GLAUCONIET illiet-groep

Glauconiet is een aan biotiet verwant kleimineraal dat alleen in mariene milieu's kan ontstaan. Het wordt aangetroffen in zanden, zandsteen en kalksteen. Glauconiet kan kristallen vormen waaraan eigenschappen vastgesteld kunnen worden, vaker echter zijn de kristallen daarvoor te klein en te slecht ontwikkeld. De kristalletjes vormen bolvormige aggregaten met diameters tot enkele millimeters. De kleur is zeer opvallend: geelgroen tot heldergroen. Door verwerking kunnen deze glauconietpellets een roodbruine tint krijgen.

## MONTMORILLONIET $(Al,Mg)_4\{(Si,Al)_8O_{20}\}(OH)_4.nH_2O$

Dit kleimineraal behoort tot de smectietgroep. De opvallendste eigenschap van deze groep kleimineralen is hun vermogen om grote hoeveelheden water in hun kristalstructuur op te nemen of af te staan, zij behoren tot de 'zwellende kleimineralen'.

Montmorilloniet ontstaat als verweringsproduct van vooral basische gesteenten. Het is het belangrijkste mineraal in 'bentoniet'. Bentoniet is de naam voor een kleimengsel dat ontstaat door verwerking van vulkanische as. Het zwellend vermogen van bentoniet kan zo groot zijn dat het, geplatst in water, opzwelt tot een volume enige malen groter dan het oorspronkelijke volume. Deze eigenschap maakt bentoniet tot een zeer interessante klei. Het wordt diensgevolge gebruikt als absorberend medium voor bijvoorbeeld schadelijke stoffen (olie, vervuild water, ed). Bentoniet wordt ook gebruikt als vulmiddel in o.a. pesticiden, kunstmest en veevoer. Bentoniet is tevens een belangrijke grondstof voor boerspelingen – het verhoogt de viscositeit van de vloeistof.

## KWARTSGROEP $SiO_2$

Mineralen uit de kwartsgroep behoren tot de tectosilicaten. De kristalstructuur bestaat uit een ruimtelijke ordening van  $SiO_4$ -tetraëders. Naast Si en O zijn er verder geen andere elementen aanwezig. Het blijkt dat er diverse mogelijkheden zijn om de tetraëders te groeperen: er bestaan verschillende polymorfen van kwarts zoals stishoviet, coesiet, tridymiet, cristobaliet,  $\alpha$ -kwarts en  $\beta$ -kwarts. Deze hebben allen de chemische samenstelling  $SiO_2$ . De kwartsvarianten die het meeste voorkomen zijn lage-T kwarts ( $\alpha$ -kwarts: trigonaal) en hoge-T kwarts ( $\beta$ -kwarts: hexagonaal). Wordt over 'kwarts' gesproken dan wordt  $\alpha$ -kwarts bedoeld. Deze kwarts heeft grofkristallijne varianten maar ook cryptokristallijne (zéér fijnkristallijne) varianten. Deze cryptokristallijne varianten worden chalcedoon (vezelig) en jaspis (korrelig) genoemd. Naast deze kristallijne vormen bestaat ook nog een amorphe vorm: opaal.

## KWARTS

Kristalvorm:	Tr: 32
Kleur:	gewoonlijk grijs of ondoorzichtig wit, ook: kleurloos, helder: bergkristal paars: amethist rookbruin: rookkwarts roze, vaak massief: rozenkwarts geel, transparant: citrien groen, vaak massief: aventurijn met asbest vergroeid: tijgeroog
Streep:	-
Glans:	glasglans
Hardheid:	7
Splijting:	-
s.g.:	2.65
Bijzonderheden:	Karakteristiek is de hardheid, de glasglans, de afwezigheid van splijting en de schelpvormige breuk. Indien kristallen aanwezig zijn is op de prismavlakken een fijne dwarsstreping aanwezig



Voorkomen:	Na veldspaten komt kwarts op de aarde het meeste voor, het is een zeer algemeen mineraal in alle typen gesteenten.
Toepassing:	Kwartzand wordt gebruikt in cement, beton, schuurpapier, polijstmiddelen, porselein en glas. Heldere kwarts wordt gebruikt voor optische doeleinden: lenzen, prisma's, monochromatoren. De piezo-elektrische eigenschappen van kwarts maken het mineraal geschikt voor toepassingen in de elektronica van radio's, radars, telefoons, horloges, microprocessors. Er zijn nog zeer veel andere toepassingen. De vraag naar vooral zeer heldere en zuivere kwartzkristallen is zó groot dat halverwege de vorige eeuw al over gegaan is naar het gebruik van synthetische kwartzkristallen. Natuurlijke kwartzkristallen worden nog steeds gebruikt maar voldoen meestal niet aan de hoge kwaliteitseisen en worden dan gebruikt voor de fabricage van synthetische kwartzkristallen.

## **CHALCEDOON**      $\text{SiO}_2$

Chalcedoon is een verzamelnaam voor allerlei micro- tot cryptokristallijne vezelige kwartzvariëteiten. Chalcedoon kan in vele kleuren voorkomen zoals rood (carneool), lichtgroen (chrysopraas), zwart-wit gelaagd (onyx), donkergroen met rode vlekken (heliotroop), e.a. Ook vuursteen wordt opgebouwd uit chalcedoon, hoewel hierin vaak ook korrelige cryptokristallijne kwarts ('jaspis') aanwezig is.

De bovengenoemde bij kwarts genoemde eigenschappen zijn ook van toepassing op chalcedoon. Let op: de genoemde eigenschappen hebben betrekking op kristallen, deze zijn bij chalcedoon wel héél erg klein!

## **OPAAL**      $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Opaal is een min of meer amorfe kwartzvariëteit. Onderzoek heeft uitgewezen dat niet alle opalen amorf zijn. In sommige opalen is op microscopische schaal een geordende structuur aanwezig waarin tridymiet of cristobaliet kristalstructuren te herkennen zijn. Deze kristalkiemen bevinden zich in zeer kleine bolletjes. Tussen deze bolletjes zijn ruimten die ofwel hol zijn, ofwel gevuld zijn met watermoleculen. Het watergehalte varieert meestal tussen 4% en 9% maar kan oplopen tot 25%. De fysische eigenschappen zijn afhankelijk van het watergehalte.

Kristalvorm:	zie boven
Kleur:	zeer variabel, de meeste opalen hebben witte, grijze of bruine onopvallende tinten
Streep:	-
Glans:	glasglans tot vetglans
Hardheid:	5 - 6
Splijting:	-
s.g.:	2.0 – 2.3

Bijzonderheden: Sommige opalen 'opaliceren'. Afhankelijk van de lichtval treden kleurschitteringen op. Deze kleuren kunnen ontstaan in opalen waarin de bovengenoemde bolletjesstructuur aanwezig is. Het witte licht kan op de grensvlakken tussen bolletjes en poriën in verschillende golflengten, en dus in verschillende kleuren, gebroken en gereflecteerd worden. Opalen met dergelijke 'interne reflecties' zijn zeldzaam en dus kostbaar, het worden edelopalen genoemd. De bekende Australische opalen laten een scala van blauwe, rode en groene kleuren zien.

Naast opaliceren kan ook 'opalescentie' optreden: het blauwe licht uit het spectrum wordt gereflecteerd waardoor een melkachtige lichtblauwe kleur ontstaat. De gele en rode kleuren passeren de opaal en treden aan de andere kant van de opaal als rood(achtig) licht naar buiten.

Voorkomen:	opaal vormt zich door uitharding van silicagels die in waterige (warmere) oplossingen kunnen ontstaan. De meeste silicagels ontstaan door oplossing van silicaskeletjes in een marien milieu.
Toepassing:	Amorfe kwarts wordt verwerkt in polijstmiddelen. Opalen die opaliceren of opalesceren kunnen als edelsteen verwerkt worden.



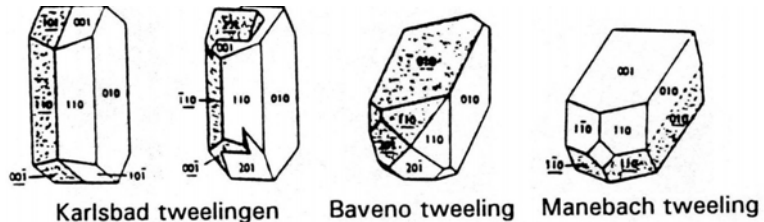


nidien. Alkaliveldspaten kunnen tijdens hun vorming kleine hoeveelheden Na in hun rooster opnemen. Tijdens de afkoeling na de vorming past deze Na echter niet meer in het rooster.

De Na scheidt zich af en reageert met de alkaliveldspaat om albit, de Na-plagioklaas, te vormen. Als deze albit is ontstaan is zij te zien als kleine parallel georiënteerde 'vlekjes en sliertjes', in de alkaliveldspaten. Dit ontmengingsverschijnsel wordt 'perthiet' genoemd. Alkaliveldspaten zijn vaak aan deze perthiet te herkennen.



De alkaliveldspaten hebben tevens tweelingsvormen gemeen, namelijk tweelingen volgens de Karlsbadwet (de C-as is de tweelingsas), de Manebachwet (tweelingsvlak: {001}) en de Bavenowet (tweelingsvlak: {021}). Vooral Karlsbadtweelingen zijn zeer algemeen.



Alkaliveldspaten, vooral orthoklaas en microklien, worden intensief ontgonnen ten behoeve van de fabricage van glas, aardewerk en porselein. Daarnaast wordt alkaliveldspaat verwerkt in schuurpoeder (cif), emailles, kunstgebitten, verf, et cetera.

### MICROKLIEN $K(AlSi_3O_8)$

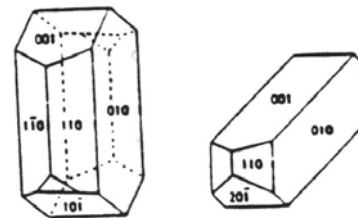
Kristalvorm: Triklien:  $\bar{1}$   
 Kleur: wit, grijs, een enkele keer roze of groen ('amazoniet')  
 Streep: -  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 6  
 Spletting: {001}: perfect, {010}: goed  
 s.g.: 2.5 – 2.6

Bijzonderheden: Zie bij de algemene beschrijving van de alkaliveldspaten. Microklien heeft naast bovengenoemde tweelingsvormen tevens twee lamellaire tweelingsvormen. Deze vormen smalle lamellen: de twee sets staan zo goed als loodrecht op elkaar waardoor een soort rasterpatroon ontstaat. Deze tweelingsvormen zijn macroscopisch zelden zichtbaar.

Voorkomen: Zeer algemeen mineraal.  
 Toepassing: zie boven

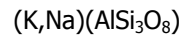
### ORTHOKLAAS $K(AlSi_3O_8)$

Kristalvorm: 2/m  
 Kleur: wit, grijs, soms roze of rood  
 Streep: -  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 6  
 Spletting: {001}: goed, {010}: duidelijk, {110}: zwak  
 s.g.: 2.6

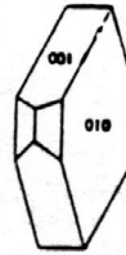


Bijzonderheden: Zie bij de algemene beschrijving van de alkaliveldspaten. Zuivere orthoklaas heeft een witte of grijze kleur. De aanwezigheid van heel kleine deeltjes  $Fe_2O_3$  geeft het mineraal een roze of rode tint.

Voorkomen: Zeer algemeen mineraal  
 Toepassing: Zie bij algemeen verhaal over alkaliveldspaten.

**SANIDIEN**

Kristalvorm: M: 2/m  
 Kleur: kleurloos, wit, grijs, soms roze(rood)  
 Streep: -  
 Glans: glasglans  
 Hardheid: 6  
 Spletting: {001}: perfect, {010}: goed  
 s.g.: 2.5 – 2.6



Bijzonderheden: Zie bij de algemene beschrijving van alkaliveldspaten. Sanidien vorm vaak plaatvormige kristallen  
 Voorkomen: Vulkanische gesteenten en in hoge-T contactmetamorfe gesteenten  
 Toepassing: Zie bij algemeen verhaal over alkaliveldspaten.

**PLAGIOKLAASGROEP**

Deze Na-Ca veldspaten vormen een mengreeks met als eindleden: albiet (Ab):  $Na(AlSi_3O_8)$   
 anorthiet (An):  $Ca(Al_2Si_2O_8)$

Deze mengreeks is continu.  $Na^+$  en  $Ca^{2+}$  kunnen elkaars plaats innemen. Ladingcompensatie geschiedt door vervanging van  $Si^{4+}$  door  $Al^{3+}$ . De chemische formule kan ook geschreven worden als:  $(Na,Ca)(Al_{1-2}Si_{3-2}O_8)$ . Het is gebruikelijk om de afzonderlijke leden van de plagioklaasgroep te beschrijven naar het percentage anorthiet (%An) dat in de totale chemische samenstelling aanwezig is:

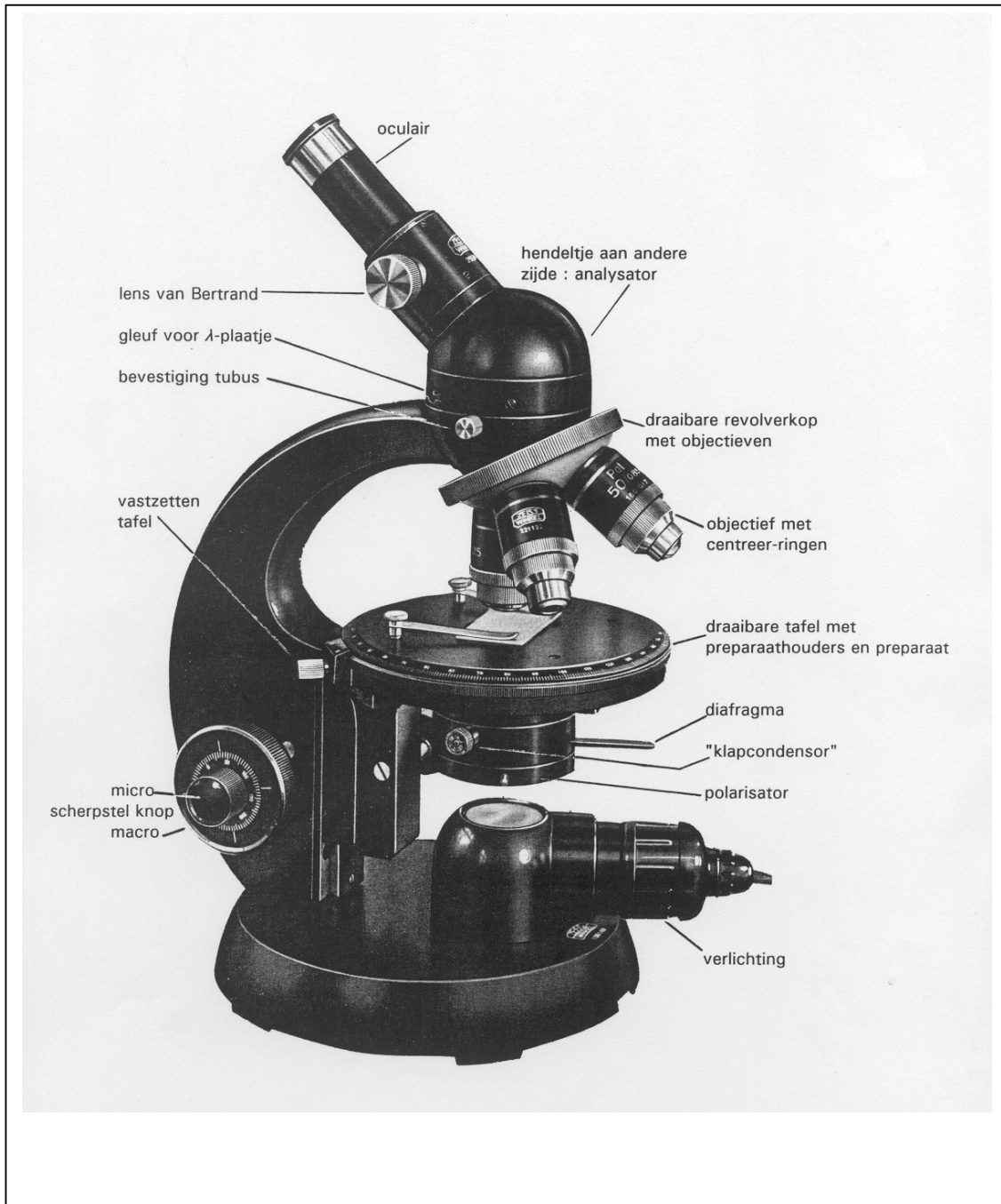
% An	Naam	Voorkomen:
05-10	albiet	in zure magmatische gesteenten en in laagmetamorfe gesteenten
10-30	oligoklaas	in zure tot intermediaire magmatische gesteenten en in metamorfe gesteenten
30-50	andesien	in intermediaire tot basische magmatische gesteenten en in metamorfe gest.
50-70	labradoriet	in basische magmatische gesteenten en in metamorfe gesteenten.
70-90	bytowniet	In (ultra)basische magmatische gesteenten
90-100	anorthiet	In (ultra)basische magmatische gesteenten

De alkaliveldspaten behoren tot de groep van de tectosilicaten, de structuur bestaat uit een ruimtelijk bouwwerk van  $SiO_4$ -tetraëders. De plagioklazen hebben als de alkaliveldspaten tweelingen volgens de Karlsbadwet, de Manebachwet en de Bavenowet (zie bij alkaliveldspaten). Karakteristiek voor deze groep zijn ook lamellaire tweelingen volgens de albietwet (tweelingsvlak: {010}). Deze tweelingswet geeft lamellen die (bijna) altijd in de plagioklaasleden ontwikkeld zijn (niet in laagmetamorfe plagioklaas). Microscopisch (polarisatiemicroscopie) zijn deze lamellen als 'zebrastrepen' aanwezig. Macroscopisch zijn deze lamellen soms als een zeer fijne streping zichtbaar (niet op {010}-vlakken). Deze streping is vaak het enige kenmerk waarmee plagioklaas met zekerheid van alkaliveldspaten onderscheiden kunnen worden.

Kristalvorm: 1  
 Kleur: wit, grijs, soms groenig of roze  
 Streep: -  
 Glans: glas- tot parelmoerglans  
 Hardheid: 6  
 Spletting: {001}: perfect, {010}: goed  
 s.g.: 2.6 – 2.8



Bijzonderheden: De kristallen zijn over het algemeen wit. Door ververing van vooral de Ca-rijkere leden kunnen minuscule kristalletjes ontstaan van groene mineralen (o.a. epidoot, klinozoisiet, chloriet). Deze geven de plagioklaaskristallen een groenige zweem. Sommige donkergekleurde labradorietkristallen vertonen, afhankelijk van de lichtval, een levendig kleurenspeel met blauwe, groene, gele en paarse tinten. Deze kleuren zijn het gevolg van brekingseffecten op een zéér fijn lamellenpatroon. Dit is een vorm van iridescentie en wordt in labradoriet ook wel 'labradorescentie' genoemd.  
 Voorkomen: zie boven  
 Toepassing: In tegenstelling tot de alkaliveldspaten geen tot weinig toepassingen.



*Figuur 18: een voorbeeld van een polarisatiemicroscoop*

# 5. Optische mineralogie

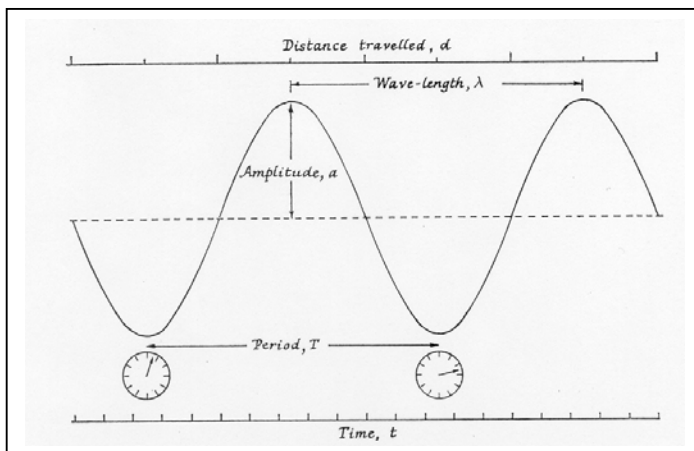
## 5.1. Inleiding

Soms zijn mineralen zo klein, bijvoorbeeld in gesteenten, dat ze macroscopisch niet goed meer gedetermineerd kunnen worden. Dan wordt het tijd om over te stappen naar microscopisch onderzoek; de belangrijkste functie van een microscoop is immers dat hij vergroot. Voordat mineralen microscopisch onderzocht kunnen worden is het nodig ze zo te prepareren dat microscoplicht er doorheen kan schijnen. Om dit te bereiken worden de mineralen in het gesteente afgeslepen tot een dun plakje met een dikte van 30  $\mu\text{m}$  (0.03 mm) - bij deze dikte zijn de meeste mineralen transparant. Dit dunne plakje bevindt zich op een objectglaasje en wordt afgedekt met een heel dun dekglasje. De lijm die hierbij in gebruik is wordt canadabalsem genoemd. Oorspronkelijk was dit een natuurlijke hars met een constante brekingsindex (1.573). Tegenwoordig is het materiaal vaak synthetisch en, helaas, is de brekingsindex minder constant. Het preparaat is nu gereed. Dergelijke preparaten worden slijpplaatjes of dunne doorsneden (afgekort: dd's) genoemd.

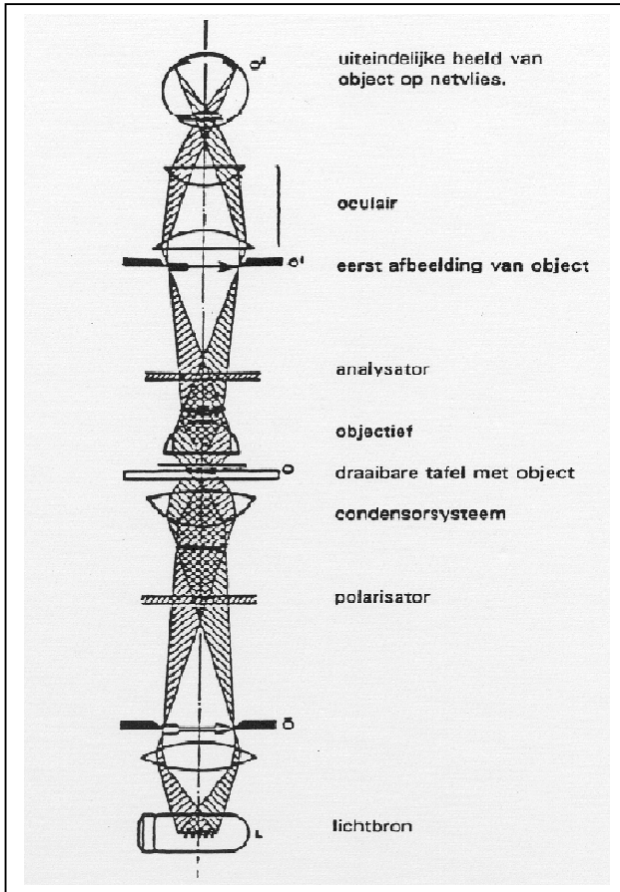
De slijpplaatjes kunnen nu microscopisch onderzocht worden. Hiervoor wordt een speciale microscoop gebruikt, een zogenaamde polarisatiemicroscoop (fig. 18). Deze microscoop wordt zo genoemd omdat twee polarisatiefilters, ook wel nicols genoemd, in de microscoop zijn ingebouwd. Een polarisatiefilter filtert het licht en laat slechts één trillingsrichting door; licht dat in één richting trilt wordt gepolariseerd licht genoemd. Eén van de twee polarisatiefilters bevindt zich onder de draaibare tafel waarop het slijpplaatje gelegd wordt, dit filter wordt de polarisator genoemd. De polarisator staat altijd ingeschakeld, er wordt met andere woorden altijd met gepolariseerd licht gewerkt. Het tweede polarisatiefilter bevindt zich boven het slijpplaatje. Dit filter wordt de analysator genoemd. De analysator kan in- en uitgeschakeld worden. Indien de analysator ingeschakeld wordt is de oriëntatie van de analysator zodanig dat polarisator en analysator gekruist staan ("gekruiste nicols"). Dat wil zeggen dat de trillingsrichting die de polarisator doorlaat loodrecht staat op de trillingsrichting die de analysator doorlaat. Deze situatie is ideaal voor microscopisch onderzoek van mineralen.

Tijdens microscopisch onderzoek kunnen een aantal eigenschappen onderzocht worden die ook macroscopisch al bestudeerd konden worden, zoals de kleur, de splijting en soms de kristalvorm. Andere eigenschappen zoals bijvoorbeeld het soortelijk gewicht en de hardheid vallen af. Daar staat echter tegenover dat de interactie met gepolariseerd licht weer andere, optische, eigenschappen oplevert. Elk mineraal wordt gekarakteriseerd door een unieke combinatie van optische eigenschappen.

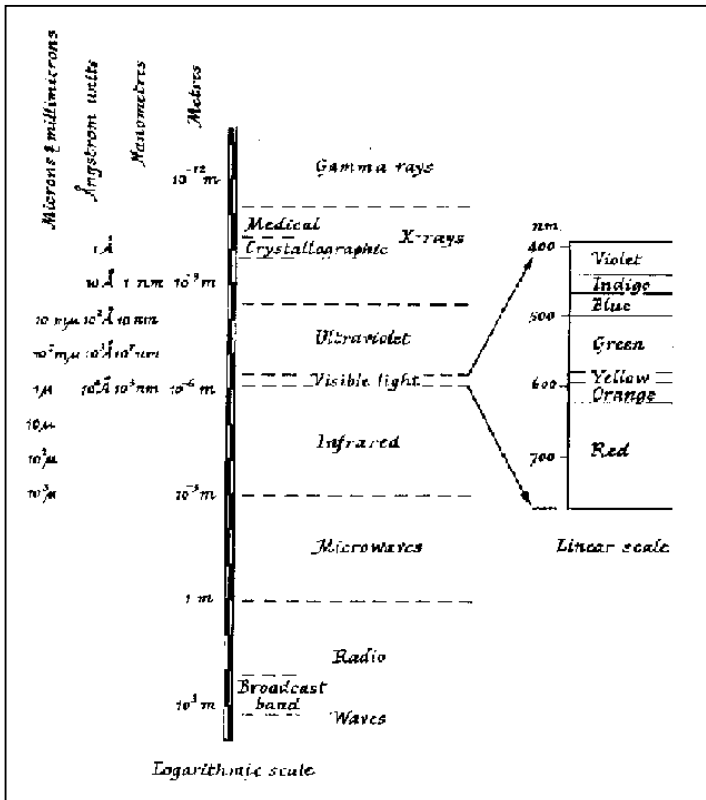
Licht is een elektromagnetische straling. Voor dit doel het beste te beschrijven als een golfverschijnsel (zie fig. 19). Licht bestaat uit een ontelbaar aantal golfbewegingen, die alle loodrecht op de voortplantingsrichting van het licht trillen. De golfbewegingen binnen het licht variëren wat betreft hun golflengte, amplitude etcetera. Een onderverdeling is gebaseerd op de golflengte (fig. 21). Het zichtbare licht bestaat uit golflengtes die ons oog als kleuren kan waarnemen. Normaliter vallen deze golflengtes tegelijk in ons oog. We zien dit als wit transparant licht; deze kleur ontstaat door menging van de afzonderlijke kleuren.



Figuur 19: licht als golfbeweging  
Bron: Battey. Mineralogy for students (1981)



Figuur 20: de stralengang door een polarisatiemicroscoop



Figuur 21 Onderverdeling van het licht naar de golflengte.  
Bron: Battey. Mineralogy for students (1999)

## 5.2. De brekingsindex

Door de microscoop wordt wit licht gestuurd. Dit witte licht valt op de mineralen. Als een lichtstraal op een mineraal valt worden elektronen die door de lichtstraal geraakt worden in trilling gebracht. Hierdoor verliest de lichtstraal een deel van haar energie, haar snelheid neemt af.

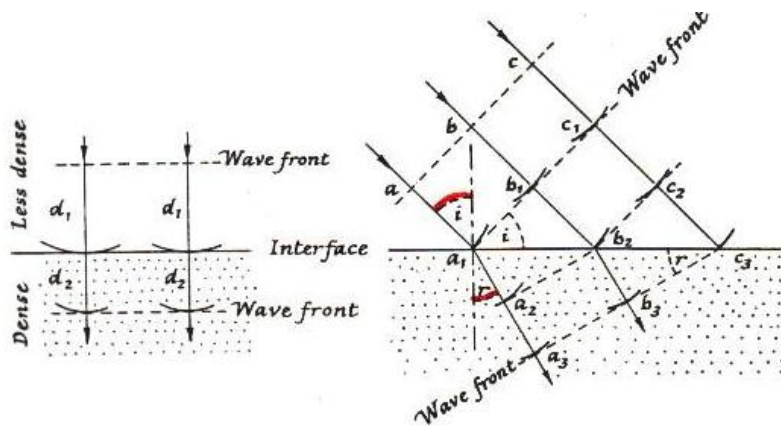
Deze snelheidsverandering wordt de brekingsindex ( $n$ ) genoemd. Deze verandering van snelheid wordt aangegeven met de ratio tussen de snelheid van licht in vacuüm en de snelheid van licht in het mineraal:

$$n_{\min} = v_{\text{vacuum}} / v_{\min} \approx v_{\text{lucht}} / v_{\min} \quad n = \text{brekingsindex} \\ v = \text{snelheid van licht}$$

In de praktijk vergelijken we de snelheidsverandering niet met de snelheid van licht in vacuüm maar met de snelheid van licht in lucht. Aangezien de snelheid van licht in een mineraal altijd minder is dan de snelheid van licht in vacuüm, of in lucht, is de brekingsindex van een mineraal dus altijd een getal boven de 1.

Een lichtstraal die vanuit de lucht loodrecht op een mineraal invalt, verliest een deel van zijn snelheid. Van een lichtstraal die scheef invalt, verandert niet alleen de snelheid maar ook de richting, deze lichtstraal ondervindt breking (zie fig. 22). Bij vertraging van de lichtstraal vindt breking naar de normaal toe plaats (verlaat de lichtstraal het mineraal dan wordt de straal versneld, er vindt breking plaats van de normaal af). De brekingsindex is ook weer te geven als maat van deze breking:  $n = \sin i / \sin r$  ( $= v_{\text{vacuum}} / v_{\min}$ ). De breking en de brekingsindex zijn afhankelijk van de golflengte. De breking voor bijvoorbeeld blauw licht is minder dan de breking voor rood licht. Dit verschijnsel wordt dispersie genoemd.

De vertraging die een lichtstraal in een mineraal ondervindt is afhankelijk van het aantal elektronen dat in trilling gebracht wordt. De vertraging is met andere woorden afhankelijk van het aantal atomen of ionen dat de lichtstraal tegenkomt. De brekingsindex is dus afhankelijk van de kristallijne structuur van het mineraal. Deze kristallijne structuur kan zó regelmatig zijn dat het niet uitmaakt hoe de lichtstraal op het mineraal valt - de vertraging is overal gelijk. Kubische mineralen hebben een dergelijke regelmatige opbouw. Uit welke richting een lichtstraal het mineraal ook nadert, de vertraging, en dus de brekingsindex, is overal gelijk. Dit is niet het geval bij mineralen uit de andere kristalstelsels, deze mineralen hebben een minder symmetrische kristallijne structuur. De brekingsindex is bij dergelijke mineralen afhankelijk van de oriëntatie van het mineraal. Valt een lichtstraal bijvoorbeeld evenwijdig aan de kristallografische C-as in dan zal een vertraging optreden die anders is dan de vertraging die optreedt als de lichtstraal evenwijdig aan de kristallografische A-as invalt. Alle niet-kubische mineralen hebben dus meerdere brekingsindices. In feite beslaat de brekingsindex een range van waarden, er is altijd een oriëntatie aanwezig waarin de brekingsindex minimaal is en een oriëntatie waarin de brekingsindex maximaal is.



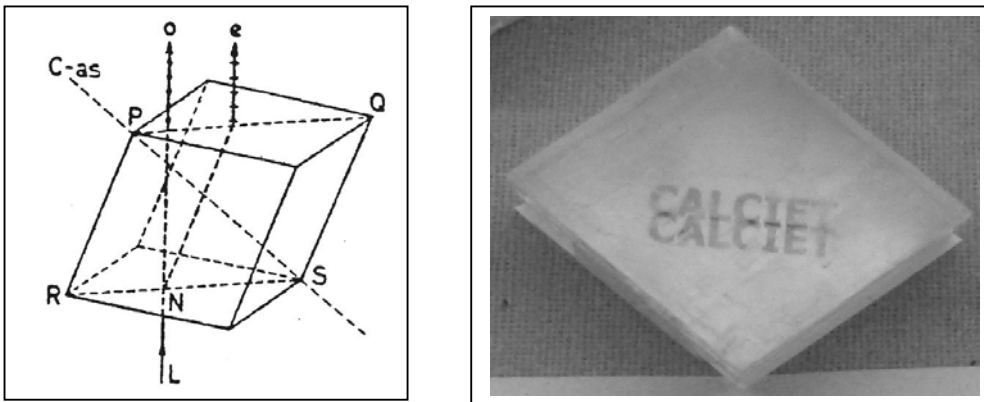
Figuur 22: Breking van een lichtstraal. Bron: *Battley, Mineralogy for students (1999)*

Een lichtstraal die op een mineraal valt zal niet alleen gebroken worden maar ook gereflecteerd worden: de hoek van inval is gelijk aan de hoek van terugkaatsing. Valt een lichtstraal heel erg scheef in dan zal geen breking meer optreden maar alleen reflectie. Er is een grenshoek aanwezig waarbij alleen nog maar reflectie optreedt, deze kritische hoek is afhankelijk van het mineraal.

Het blijkt dat veel eigenschappen van mineralen richtingsafhankelijk zijn. Dit is niet alleen het geval voor de brekingsindex. Ook de hardheid, de kleur, de splijting en andere eigenschappen kunnen afhankelijk zijn van de oriëntatie binnen het kristal (het mineraal kyaniet als voorbeeld: de hardheid in de lengterichting van het kristal bedraagt 5, loodrecht hierop bedraagt de hardheid 7). Deze richtings(on)afhankelijkheid wordt aangegeven met de woorden isotroop en anisotroop. Een mineraal gedraagt zich isotroop indien het mineraal in alle richtingen hetzelfde gedrag vertoont; de eigenschappen van het mineraal zijn met andere woorden overal gelijk en niet richtingsafhankelijk. Dit is het geval bij kubische mineralen, maar bijvoorbeeld ook bij gassen en vloeistoffen. Een mineraal gedraagt zich anisotroop indien de eigenschappen van het mineraal variëren en wel richtingsafhankelijk zijn. Dit is het geval bij alle niet-kubische mineralen

### 5.3. Dubbelbreking

Een lichtstraal die vanuit lucht op een mineraal valt ondervindt dus een verandering van snelheid. Een maat voor deze snelheidsverandering wordt gegeven door de brekingsindex. In een aantal gevallen is de kous hiermee echter niet af. In veel situaties treedt ook dubbelbreking op. Dubbelbreking is een eigenschap die alle anisotrope mineralen vertonen. Kubische mineralen vertonen dus geen dubbelbreking. Dubbelbreking wil zeggen dat een lichtstraal die op het mineraal valt zich in het mineraal splitst in twee lichtstralen. Calciet is een mineraal dat dit verschijnsel in extreme mate laat zien zoals blijkt uit figuur 23: het woord 'calciet' wordt tweemaal afgebeeld.



*Figuur 23: de dubbelbreking van calciet*

Een lichtstraal (L) valt in dit geval loodrecht op een splijthomboëder van calciet. Deze lichtstraal splitst zich in twee deelstralen. Eén straal, de ordinaire straal (o), gaat rechtdoor. Daarnaast ontstaat een tweede straal die een andere koers door het mineraal volgt, deze tweede straal wordt de extra-ordinaire straal (e) genoemd. Een maat voor de dubbelbreking (dB) is de hoek tussen de twee deelstralen. De dubbelbreking kan ook aangegeven worden met het verschil tussen de brekingsindices van de twee deelstralen. De dubbelbreking wordt doorgaans weergegeven met de algemene formule  $dB = (n_z - n_x)$ , waarbij  $n_z > n_x$ . Bij calciet is de dubbelbreking gelijk aan  $(n_o - n_e)$ .

Aangezien de brekingsindex een richtingsafhankelijke eigenschap is, is ook de dubbelbreking afhankelijk van de oriëntatie van het mineraal ten opzichte van de invallende straal. De brekingsindex is tevens afhankelijk van de golflengte van het licht; ook de dubbelbreking is dus een golflengte-afhankelijke eigenschap.

Het verschijnsel dubbelbreking gaat samen met een ander verschijnsel. Het blijkt dat de beide deelstralen in het kristal gepolariseerd worden in twee richtingen loodrecht op elkaar, zie figuur 23. Voor de e-straal is het trillingsvlak evenwijdig aan het papier, het trillingsvlak van de o-straal staat hier loodrecht op

De twee deelstralen ondervinden in het mineraal een verschillende vertraging, daar de brekingsindex in beide richtingen niet gelijk is. De snelheid van de deelstralen is met andere woorden verschillend, evenals de golflengte, de amplitude, de frequentie e.d. Als de twee deelstralen het mineraal weer verlaten worden zij weer versneld. De stralen krijgen de oorspronkelijke richting, snelheid, golflengte en frequentie terug, zij blijven wel gepolariseerd in twee richtingen loodrecht op elkaar. De weglengte van de beide deelstralen in het mineraal is echter verschillend. In het geval van calciet is de weg die de e-straal in het mineraal aflegt beduidend langer dan de weg die de o-straal in het mineraal aflegt. Ondanks dat de e-straal in calciet sneller is dan de o-straal blijkt dat de e-straal bij het verlaten van de calciet achterop is geraakt. Een vergelijking van de golfbeweging

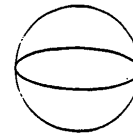


van de twee deelstralen leert dat de golfbeweging van de e-straal achter loopt, de twee deelstralen zijn bij het verlaten van het mineraal uit fase. Dit faseverschil wordt in de optische mineralogie het gangverschil (G) genoemd. De dubbelbreking is een richtingsafhankelijke eigenschap, ook het gangverschil wordt dus bepaald door de oriëntatie van het mineraal ten opzichte van de invallende lichtstraal.

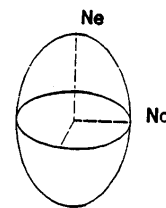
#### 5.4. De indicatrix

Per mineraal is uitgezocht welke waarden de brekingsindices kunnen hebben, welke dubbelbreking en welk gangverschil kan optreden. Het blijkt dat de waarden voor de brekingsindices per mineraal vastgelegd kunnen worden in een ruimtelijk lichaam. Dit ruimtelijke lichaam wordt een indicatrix genoemd. Elk mineraal heeft een karakteristieke indicatrix met een karakteristieke vorm en grootte. Een indicatrix heeft altijd de vorm van een ellipsoïde. Deze ellipsoïden zijn in vier basisgroepen in te delen:

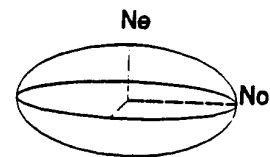
De indicatrix is een ellipsoïde met een ellipticiteit 0 - de indicatrix is met andere woorden een bol. Dat wil zeggen dat de brekingsindex in alle richtingen hetzelfde is. Hoe een lichtstraal ook op het mineraal valt, hij zal altijd dezelfde brekingsindex ondervinden, dezelfde vertraging oplopen. Isotrope mineralen hebben een dergelijke indicatrix. Hiertoe behoren de kubische mineralen.



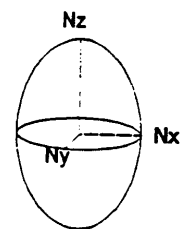
De indicatrix is een omwentelingsellipsoïde waarbij de verticale as omwentelings-symmetrisch is. Een dergelijke indicatrix kan alleen behoren bij mineralen uit het trigonale, tetragonale of hexagonale stelsel. De oriëntatie van de omwentelingsas van de indicatrix valt samen met de richting van de kristallografische C-as van het mineraal. Loodrecht op de C-as is in deze stelsels een hoge symmetrie aanwezig: de kristallografische A- en B-as (en eventueel de D-as) zijn identiek qua lengte en regelmatig verdeeld. Deze hoge symmetrie uit zich in de hoge symmetrie van de indicatrix. Loodrecht op de omwentelingsas is de doorsnede van de indicatrix een cirkel. Mineralen met een dergelijke indicatrix hebben twee karakteristieke brekingsindices,  $n_o$  en  $n_e$ . De lichtstralen die parallel aan de C-as trillen, ondervinden de meeste vertraging, hierbij hoort de brekingsindex  $n_e$ , de lichtstralen die hier loodrecht op trillen ondervinden de minste vertraging, hierbij hoort de brekingsindex  $n_o$ . Lichtstralen die tussen deze twee oriëntaties invallen ondervinden een brekingsindex die tussen de waarden van  $n_e$  en  $n_o$  in zal liggen. Voor mineralen met een dergelijke indicatrix geldt:  $n_e > n_o$ . De brekingsindices van kwarts worden weergegeven met deze vorm indicatrix.



De derde groep is vergelijkbaar met de tweede groep. De indicatrix is weer omwentelings-symmetrisch, nu echter sterk afgeplat. Ook deze indicatrix hoort bij mineralen uit het trigonale, tetragonale of hexagonale stelsel. Nu is echter de lengte van de omwentelingsas kleiner dan de diameter van de cirkelsnede. De  $n_e$  van deze mineralen is dus kleiner dan de  $n_o$ . Dit is onder andere het geval bij het mineraal calciet.



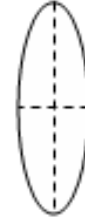
De indicatrix die behoort tot de vierde groep is niet omwentelings-symmetrisch. De vorm van de indicatrix komt overeen met de vorm van een algemene ellipsoïde waarbij de drie assen van de ellipsoïde alle een verschillende lengte hebben. Deze indicatrix hoort bij mineralen die drie karakteristieke brekingsindices hebben ( $n_x$ ,  $n_y$  en  $n_z$ ). De halve lengtes van de assen van de ellipsoïde komen overeen met de  $n_x$ ,  $n_y$  en  $n_z$  van het mineraal waarbij  $n_z > n_y > n_x$ . De symmetrie van deze indicatrix komt niet meer overeen met de symmetrie van trigonale, tetragonale of hexagonale mineralen. Alléén mineralen uit het triklinen, monoklinen en orthorhombische stelsel hebben een dergelijke indicatrix



De indicatrices geven de mogelijke variatie van de brekingsindices binnen een mineraal weer. De indicatrix geeft echter ook informatie over de mogelijke dubbelbreking. Wat is het verband tussen dubbelbreking en indicatrix?

De oriëntatie van de indicatrix binnen het mineraal ligt vast. Let op, een indicatrix is een door de mens geconstrueerd ruimtelijk lichaam. Het geeft eigenschappen weer, maar het is een denkbeeldig lichaam, het is niet daadwerkelijk aanwezig binnen het mineraal. Om te begrijpen wat er gebeurt kan het zinvol zijn om deze indicatrix, dit denkbeeldige lichaam, in gedachten te houden, als ware het aanwezig binnen het mineraal. Wordt een mineraal doorgesneden om een  $dd$  te maken, dan wordt ook de indicatrix op een bepaalde manier doorgesneden. Deze doorsnijding van de indicatrix gaat altijd door het centrum van de indicatrix.

De indicatrix geeft nu als (denkbeeldige) doorsnede een ellips, de zogenaamde 'ellips van doorsnede'. In deze ellips van doorsnede is, door het centrum van de ellips, zowel een langste als een kortste as te construeren, deze staan loodrecht op elkaar. De vorm van de ellips van doorsnede, en dus de lengtes van de assen, verklaren enkele optische eigenschappen van het mineraal in deze oriëntatie. Andersom is het zo dat door de studie van de optische eigenschappen de vorm van de ellips van doorsnede, en uiteindelijk de vorm van de indicatrix, te bepalen is.

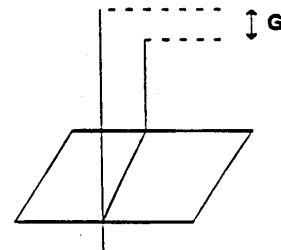


Tijdens microscopisch onderzoek van het mineraal zullen de lichtstralen loodrecht op deze doorsnede invallen. Elke lichtstraal wordt in twee deelstralen gesplitst. Deze twee deelstralen zijn gepolariseerd. De trillingsvlakken van de gepolariseerde deelstralen staan loodrecht op elkaar en komen overeen met de richting van de langste en kortste as van de ellips van doorsnede. De brekingsindices die de deelstralen in die richting ondervinden worden weergegeven door de (halve) lengtes van de assen van de ellips. Het verschil in lengte tussen de langste en kortste as van de ellips van doorsnede is dus een maat voor de dubbelbreking.

Elke indicatrix heeft dus één doorsnede waarbij het verschil tussen de lengtes van de assen maximaal is en dus de dubbelbreking maximaal is. Alleen deze maximale dubbelbreking is karakteristiek voor het mineraal. Daarnaast heeft elke indicatrix tenminste één en maximaal twee doorsneden waarbij de ellips van doorsnede een ellipticiteit nul heeft - dit zijn met andere woorden cirkels. In deze sneden treedt geen dubbelbreking op. Tussen deze twee uiterste waarden zijn alle waarden mogelijk. De dubbelbreking van een bepaalde doorsnede van een mineraal wordt met een getal weergegeven. Deze dubbelbreking is tijdens microscopisch onderzoek te bepalen. De dubbelbreking is gerelateerd aan een kleur die zichtbaar wordt als de analysator, het bovenste polarisatiefilter in de microscoop, in de lichtbundel geschoven wordt. Deze kleur wordt de interferentiekleur genoemd.

## 5.5. Gangverschil en interferentiekleur

In deze schematische tekening van een slijp-rhomboëder van calciet staat, eveneens schematisch, het verschil in optische weglengte, het faseverschil weergegeven. Dit faseverschil wordt het gangverschil ( $G$ ) genoemd. Het gangverschil wordt uitgedrukt in nanometers. Uit de tekening is af te leiden dat het gangverschil afhankelijk is van de dubbelbreking in die oriëntatie van het mineraal en van de dikte ( $d$ ) van het mineraal:  $G = d(\delta)$  ofwel  $G = d(n_z - n_x)$ . Aangezien de dikte van een slijpplaatje constant is ( $30\mu\text{m}$ ), is het gangverschil lineair gerelateerd aan de dubbelbreking. De brekingsindices zijn richtingsafhankelijke eigenschappen, de dubbelbreking is dus een richtingsafhankelijke eigenschap, het gangverschil is dus eveneens afhankelijk van de oriëntatie van het mineraal.  $G$  is tevens afhankelijk van de golflengte.



In de praktijk is natuurlijk geen sprake van slechts één lichtstraal. Er wordt gewerkt met wit licht waarin een range van golflengtes aanwezig is en zeer veel stralen die alle evenwijdig aan elkaar invallen, er wordt immers met gepolariseerd licht gewerkt. Al deze stralen splitsen zich in twee deelstralen die alle, loodrecht op elkaar, gepolariseerd worden. Afhankelijk van hun golflengte geven alle sets deelstralen een bepaald gang-verschil. Deelstralen die in hetzelfde vlak trillen kunnen interfereren. Bij het verlaten van het kristal worden alle deelstralen weer versneld en krijgen weer hun oorspronkelijke richting, golflengte, frequentie etc. Er zal weer interferentie optreden tussen stralen die in hetzelfde vlak trillen.

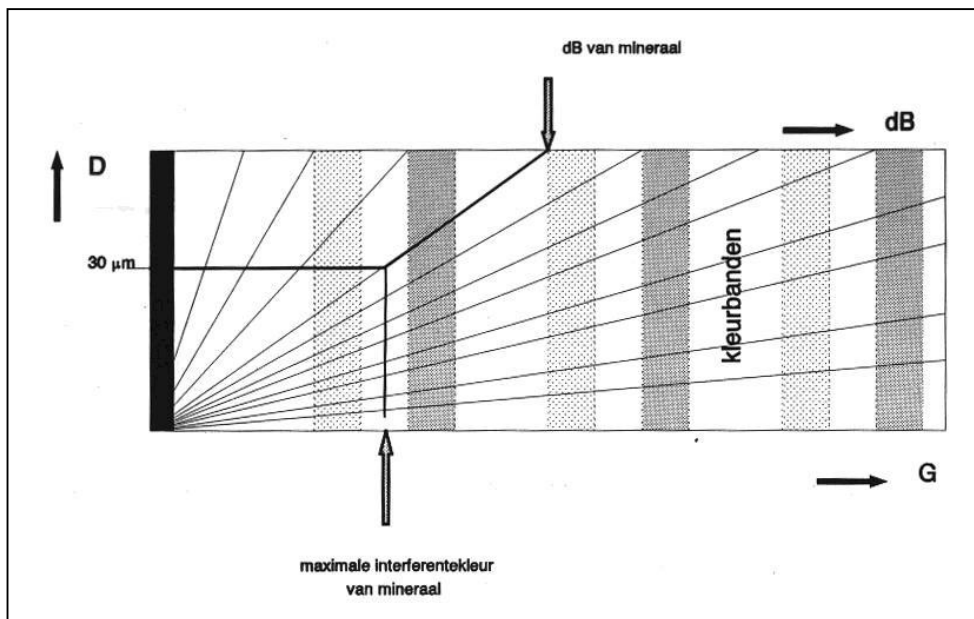
Indien de analysator, het bovenste polarisatiefilter, nu in de stralengang geschoven wordt gaat van elke deelstraal een resultante (ontbinden in vectoren!) door deze analysator. De vele deelstralen worden als het ware 'gedwongen' om in het vlak van de analysator te gaan trillen. Tussen de resultanten van de deelstralen, die nu alle in hetzelfde vlak trillen, zal opnieuw interferentie plaatsvinden. Sommige golflengtes zullen misschien versterkt worden (constructieve interferentie), anderen zullen misschien juist verzwakt worden of

zelfs helemaal verdwijnen (destructieve interferentie). De overblijvende golflengtes komen overeen met kleuren uit het zichtbare licht. De afzonderlijke kleuren gaan zich mengen waardoor een mengkleur ontstaat, deze kleur wordt de interferentiekleur genoemd. Elk gangverschil (of beter: elke combinatie van gangverschillen opgewekt door de verschillende golflengtes binnen het witte licht) komt dus overeen met een bepaalde interferentiekleur.

Dit betekent dus, daar het gangverschil gerelateerd is aan de dubbelbreking, immers  $G = d(\text{dB})$ , dat elke waarde voor de dubbelbreking te koppelen is aan een interferentiekleur. De dubbelbreking is met andere woorden te bepalen als de interferentiekleur bekend is.

Alle mogelijke interferentiekleuren zijn verzameld door de heer Michel-Lévy op de zogenaamde 'kleurenkaart van Michel-Lévy' (zie blz. 120). De kleuren zijn onderverdeeld in orden. De laagste interferentiekleuren, die kleuren die behoren bij de kleinste gangverschillen, bevinden zich in de eerste orde. De eerste orde begint met zwart en gaat via steeds lichter wordende grijs tinten naar wit, lichtgeel, oranje en rood. Hogere interferentiekleuren bevinden zich in de hogere orden. De hogere orden laten een herhaling zien van de kleuren paars, blauw, groen, geel, oranje en rood. In de tweede en derde orde zijn deze kleuren over het algemeen vrij helder en duidelijk. Daarna worden deze kleuren fletser doordat de kleuren zich meer en meer gaan mengen. Uiteindelijk is de menging zodanig dat lichte pasteltinten overblijven die zelfs kunnen overgaan in een beigeachtige witte tint. Deze kleur wit, die sterk afwijkt van de witte kleur in de eerste orde, wordt 'wit van hogere orde' genoemd. Alleen mineralen waarin tussen de deelstralen een zeer groot gangverschil ontstaat, deze mineralen hebben dus een zeer hoge dubbelbreking, vertonen dergelijke fletse tot witte interferentiekleuren. Het mineraal calciet is hiervan een voorbeeld.

De interferentiekleur van een bepaalde doorsnede van een mineraal kan bepaald worden door de interferentiekleur te vergelijken met de kleuren van de kleurenkaart (zie bladzijde 120 en figuur 24). Het bijbehorende gangverschil kan vervolgens op de kleurenkaart afgelezen worden. Bij microscopisch onderzoek wordt gewerkt met dd's waarin een plakje van een mineraal of een gesteente aanwezig is met een standaarddikte van  $30 \mu\text{m}$ . Daar een lineair verband aanwezig is tussen het gangverschil, de dikte van de dd en de dubbelbreking ( $G = d \cdot \text{dB}$ ) kan de dubbelbreking vervolgens berekend worden. Maar de relatie kan eveneens op de kleurenkaart afgelezen worden. In figuur 24 wordt het gebruik van de kleurenkaart schematisch uitgelegd. Voor elke interferentiekleur kan zo de bijbehorende dubbelbreking bepaald worden.



*Figuur 24: schematische uitleg van de kleurenkaart van Michel Lévy*

Nu wordt elk anisotroop mineraal gekarakteriseerd door een range van waarden voor de brekingsindex, dus wordt ook de dubbelbreking van een mineraal door een range van waarden weergegeven. Alle anisotrope mineralen hebben een minimale dubbelbreking waarbij een minimale interferentiekleur hoort (nl. zwart), en een maximale dubbelbreking waarbij de hoogste interferentiekleur voor het mineraal hoort (naar rechts op de

kleurenkaart betekent een hogere interferentiekleur). Tussen de minimale en maximale interferentiekleur zijn echter alle interferentiekleuren mogelijk die op de kleurenkaart tussen de zwarte en de hoogste kleur inzitten. Elk mineraal wordt met andere woorden gekarakteriseerd door een range van interferentiekleuren. Alleen de maximale dubbelbreking van een mineraal is echter karakteristiek. Om deze te kunnen bepalen zal dus eerst de maximale interferentiekleur gevonden moeten worden

Bij de bestudering van de interferentiekleur moet rekening gehouden worden met het feit dat de tafel van de microscoop, waarop de dd gelegd wordt, draaibaar is. Bekijken we in een dd een mineraal in een bepaalde doorsnede (oriëntatie) dan hebben we te maken met de hierbij behorende, denkbeeldige, ellips van doorsnede. Als de tafel van de microscoop gedraaid wordt dan draait het mineraal in de dd mee en dus ook de ellips van doorsnede. Belangrijk hierbij is dat de trillingsrichtingen van de deelstralen (evenwijdig aan de assen van de ellips) van positie veranderen ten opzichte van de trillingsrichting die de polarisator doorlaat. Is de stand zodanig dat de langste en de kortste as van de ellips van doorsnede, en dus de trillingsrichtingen van de deelstralen, evenwijdig liggen aan de trillingsrichtingen die door de polarisator en de analysator doorgelaten worden, dan zijn geen interferentiekleuren zichtbaar: het mineraal wordt zwart. Dit wordt de uitdovingsstand of  $0^\circ$ -stand genoemd. Bij draaiing van de tafel zal het mineraal om de  $90^\circ$  uitdoven, er zijn vier uitdovingsstanden.

In de uitdovingsstand ligt één van de assen van de ellips van doorsnede (het maakt niet uit of dit de langste of de kortste as is), evenwijdig aan de trillingsrichting die door het onderste polarisatiefilter, de polarisator, wordt doorgelaten. Er vindt nu geen dubbelbreking plaats. De gepolariseerde straal die de polarisator verlaat, gaat in het mineraal rechtdoor en splitst zich niet in twee deelstralen. Deze trillingsrichting staat echter precies loodrecht op de trillingsrichting die door de analysator wordt doorgelaten, en wordt dus door de analysator niet doorgelaten: er vindt uitdoving plaats. Zodra de tafel een klein beetje gedraaid wordt, zullen uit elke lichtstraal die uit de polarisator komt weer twee deelstralen ontstaan. Van elke deelstraal gaat een resultante, hoe klein ook, door de analysator: er ontstaat een interferentiekleur. De interferentiekleuren van het mineraal zullen in de standen precies tussen de uitdovingsstanden in, in de zogenaamde  $45^\circ$ -standen, het helderst zijn. In de  $45^\circ$ -stand gaat van alle deelstralen juist een maximale resultante door de analysator.

Het is dus zaak om steeds aan de tafel te blijven draaien als de interferentiekleur bestudeerd wordt. Het lijkt dan alsof de interferentiekleur daadwerkelijk van kleur verandert. Dit is echter niet het geval. De intensiteit van de interferentiekleur verandert wel en wordt minder als de uitdovingsstand genaderd wordt, de kleur zelf verandert niet. De ellips van doorsnede verandert immers ook niet van vorm.

Welke interferentiekleur zichtbaar is hangt af van de ellipticiteit van de ellips van doorsnede. Hoe groter de ellipticiteit (hoe langgerekter dus), des te groter de dubbelbreking, des te hoger de interferentiekleur. Heeft de ellips van doorsnede een ellipticiteit 0, er is dan met andere woorden sprake van een cirkel, dan zal het mineraal tijdens ronddraaien continu in de uitdovingsstand zijn. De gepolariseerde lichtstraal die de polarisator verlaat gaat in het mineraal rechtdoor en splitst zich niet in deelstralen. De straal die rechtdoor gaat wordt niet doorgelaten door de analysator: er vindt uitdoving plaats. Bij ronddraaien van de tafel verandert dit niet, er verschijnen geen interferentiekleuren.

Met dezelfde situatie hebben we te maken als een doorsnede van een kubisch mineraal bestudeerd wordt. De indicatrix van kubische mineralen is bolvormig. Alle doorsneden geven een cirkel als ellips van doorsnede. Een gepolariseerde lichtstraal die op deze doorsnede valt zal rechtdoor gaan en zich niet splitsen in deelstralen. De rechtdoorgaande straal trilt precies loodrecht op de trillingsrichting die de analysator doorlaat: deze straal wordt in zijn geheel uitgedoofd, er is geen interferentiekleur zichtbaar, het mineraal wordt zwart met ingeschakelde analysator. Welke doorsnede van een kubisch mineraal ook bekeken wordt, het mineraal zal altijd zwart worden bij inschakeling van de analysator.

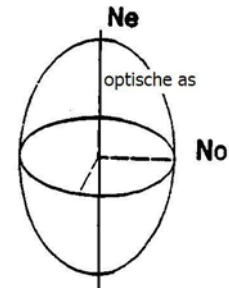
Alle anisotrope mineralen kunnen zodanig georiënteerd zijn dat de doorsnede van de indicatrix, de ellips van doorsnede, eveneens een cirkel is. Deze doorsneden gedragen zich als de doorsnede van een kubisch mineraal: wordt de analysator ingeschakeld dan wordt het mineraal zwart en blijft ook bij ronddraaien van de tafel zwart. Deze doorsneden worden isotrope doorsneden genoemd. Elk anisotroop mineraal heeft tenminste één en maximaal twee isotrope sneden.

## 5.6. Het interferentiefiguur ('assenbeeld')

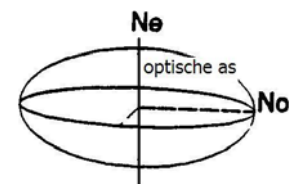
In paragraaf 5.4 zijn de vier verschillende basisvormen van de indicatrix besproken. Er kunnen vier groepen onderscheiden worden. Elk mineraal heeft zijn eigen karakteristieke indicatrix. Door studie van een mineraal door de microscoop kan achterhaald worden tot welke groep de indicatrix van dat mineraal behoort. Dit is na-

tuurlijk heel erg gemakkelijk indien de indicatrix een bol is. Bij mineralen met een bolvormige indicatrix (kubische mineralen) treedt geen dubbelbreking op - het mineraal vertoont geen interferentiekleuren. Door bepaalde optische eigenschappen van de mineralen te bestuderen zijn echter ook de andere indicatrixvormen te achterhalen. In paragraaf 5.4 zijn de verschillen tussen de basisvormen beschreven door middel van de verschillen in brekingsindices, gekoppeld aan kristallografische richtingen binnen de mineralen. Naast de bolvormige indicatrix zijn drie varianten beschreven. Over deze drie varianten is meer te vertellen.

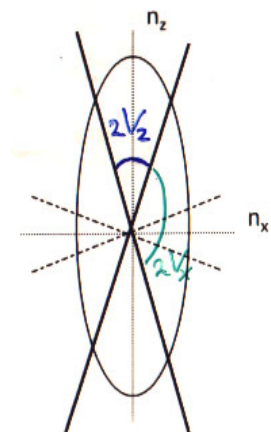
De indicatrix is een omwentelingsellipsoïde waarbij de verticale as omwentelings-symmetrisch is, de verticale as geeft informatie over de waarde van  $n_e$ . Loodrecht op de omwentelingsas geeft de indicatrix een cirkel als doorsnede. De diameter van de cirkelsnede geeft informatie over de waarde voor  $n_o$ ,  $n_e > n_o$ . Trigonale, tetragonale en hexagonale kristallen kunnen een dergelijke indicatrix hebben. Deze indicatrix heeft één cirkelsnede. Is het mineraal evenwijdig aan deze cirkelsnede doorgesneden (door de microscoop kijkt men dan loodrecht op deze snede) dan gedraagt het mineraal zich isotroop, er is geen interferentiekleur zichtbaar. De loodlijn op de cirkelsnede, die hier samenvalt met de omwentelingsas, wordt de 'optische as' genoemd. Deze indicatrix bevat één optische as - de indicatrix behoort toe aan een optisch 1-assig mineraal. In dit geval is  $n_e > n_o$ , een mineraal met deze vorm indicatrix is optisch 1-assig positief. Trigonale, tetragonale en hexagonale mineralen zijn altijd optisch 1-assig. Kwarts (trigonaal) is een voorbeeld van een optisch 1-assig positief mineraal.



Deze indicatrix is eveneens omwentelings-symmetrisch. De indicatrix is vergelijkbaar met de indicatrix van de vorige groep met dát verschil dat deze ellipsoïde sterk is afgeplat. Er is eveneens een cirkelsnede aanwezig met loodrecht hierop de optische as die samenvalt met de omwentelingsas. In dit geval is  $n_e < n_o$ . Een mineraal met deze vorm indicatrix is optisch 1-assig negatief. Trigonale, tetragonale en hexagonale mineralen zijn altijd optisch 1-assig. Calciet (trigonaal) is een voorbeeld van een optisch 1-assig negatief mineraal.



Deze indicatrix is niet omwentelings-symmetrisch. De vorm van de indicatrix komt overeen met de vorm van een algemene ellipsoïde waarbij de drie assen van de ellipsoïde allen een verschillende lengte hebben. Deze indicatrix hoort bij mineralen die drie karakteristieke brekingsindices hebben ( $n_x$ ,  $n_y$  en  $n_z$ ). De lengtes van de assen van de ellipsoïde komen overeen met de  $n_x$ ,  $n_y$  en  $n_z$  van het mineraal waarbij  $n_z > n_y > n_x$ . Deze indicatrix heeft twee cirkelsneden (stippellijn) met loodrecht op beide cirkelsneden een optische as. Deze twee optische assen bevinden zich altijd in het vlak dat door zowel  $n_z$  als  $n_x$  gaat (het assenvlak). Deze indicatrix behoort toe aan een optisch 2-assig mineraal. De hoek tussen de optische assen wordt de 'optische assenhoek' ofwel  $2V$  genoemd.



Deze indicatrix kan sterk variëren wat betreft zijn vorm. Is er een klein verschil aanwezig tussen de waarden voor  $n_x$  en  $n_y$  - de ellipsoïde heeft een wat bollere vorm - dan staan de cirkelsneden relatief vlak en de optische assen staan relatief steil. De  $n_z$  vormt dan de deellijn van de scherpe hoek tussen de optische assen ( $n_x$  vormt de deellijn van de stompe hoek tussen de optische assen).  $2V_z < 90^\circ$ : er is sprake van een optisch 2-assig positief mineraal.

Is er een groot verschil aanwezig tussen de waarden voor  $n_x$  en  $n_y$ , de ellipsoïde heeft een afgeplatte vorm, dan staan de cirkelsneden relatief steil en zijn de optische assen relatief vlak gepositioneerd. De  $n_z$  vormt de deellijn van de stompe hoek tussen de optische assen ( $n_x$  vormt de deellijn van de scherpe hoek tussen de optische assen).  $2V_z > 90^\circ$ : er is sprake van een optisch 2-assig negatief mineraal. Is de hoek tussen de optische assen precies  $90^\circ$  dan is sprake van een optisch 2-assig neutraal mineraal.

Triklieen, monoklieen en orthorhombische mineralen zijn altijd optisch 2-assig. Muscoviet (monoklien) is een voorbeeld van een optisch 2-assig negatief mineraal.

Of een mineraal optisch 1-assig of 2-assig is, optisch positief of negatief, is zichtbaar te maken door een zogenaamd interferentiefiguur of assenbeeld te maken. Hoe een assenbeeld tot stand komt is het beste voor te stellen bij een optisch 1-assig mineraal.

De optische as van een optisch 1-assig mineraal staat loodrecht op de cirkelsnede. Deze as is zichtbaar te maken door uit te gaan van de doorsnede van het mineraal waarbij de ellips van doorsnede een cirkel is (deze blijft zwart bij ronddraaien van de tafel). De microscoop moet vervolgens op een speciale manier ingesteld worden. In normale gevallen wordt tijdens de microscopie gebruik gemaakt van recht invallend gepolariseerd licht (orthoscopisch licht). Voor het maken van een assenbeeld moet het licht niet recht invallen maar juist kegelvormig (conoscopisch licht). Er is in veel microscopen een speciaal lensje ingebouwd om dat mogelijk te maken. De kegelvormig invallende lichtstralen hebben als voordeel dat in één doorsnede van een mineraal meerdere doorsneden van de indicatrix bekeken kunnen worden.

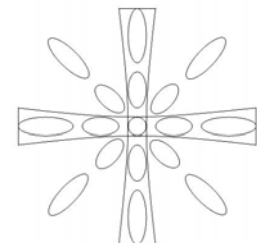
De stralen die loodrecht op de cirkelsnede van de indicatrix invallen hebben daadwerkelijk te maken met een cirkel als ellips van doorsnede. Stralen die als gevolg van de kegelvormige lichtbundel scheef op het mineraal invallen hebben niet meer met deze cirkelsnede te maken. Loodrecht op de scheef-invallende stralen geeft de indicatrix nu een ellips van doorsnede die een zekere ellipticiteit heeft ( $>0$ ). Hoe schever de stralen op het preparaat vallen des te groter de ellipticiteit van de ellips van doorsnede. Door met kegelvormig invallend licht te werken zijn dus op hetzelfde moment diverse doorsneden van de indicatrix te bestuderen.



Wat hebben we hier aan? Bij alle ellipsen hoort een dubbelbreking, een gangverschil en dus een interferentiekleur. In de afbeelding van het mineraal mengen deze interferentiekleuren zich; de totale interferentiekleur, die zichtbaar wordt na het inschakelen van de analysator, wordt hierdoor fletser. Vlak boven het objectief, in het brandpunt van de lens, worden echter de interferentiekleuren die bij de afzonderlijke ellipsen van doorsnede horen scherp afgebeeld. In het centrum van de afbeelding bevindt zich de cirkelsnede, dit is de afbeelding van de optische as, hier wordt het zwart. Hier omheen zijn de interferentiekleuren van de overige ellipsen zichtbaar. Vanaf het centrum van de afbeelding naar buiten toe, neemt de ellipticiteit van de ellipsen gelijkmatig toe, zo ook de interferentiekleur. Door de kegelvormige stralengang ontstaan zones rond het centrum waarin ellipsen met dezelfde ellipticiteit aanwezig zijn, er ontstaan dus ook banen, cirkels, met dezelfde interferentiekleur: dit worden isochromaten genoemd. Vanaf het centrum naar buiten toe is eigenlijk de kleurenkaart van Michel-Lévy zichtbaar. De interferentiekleuren die het desbetreffende mineraal kan hebben zijn in dit zogenaamde 'interferentiefiguur' vaak alle zichtbaar. Aangezien in dit interferentiefiguur, in dit geval in het centrum, de optische as wordt afgebeeld, wordt dit figuur ook wel een 'assenbeeld' genoemd.

Kwarts is een optisch 1-assig positief mineraal en heeft een maximale dubbelbreking van 0.009. Hier hoort als maximale interferentiekleur lichtgeel van de eerste orde bij. In het centrum van het interferentiefiguur wordt het zwart, hier bevindt zich de afbeelding van de optische as. Naar buiten toe zijn alleen eerste orde kleuren aanwezig, vaak is in de buitenste rand wit, of zeer lichtgeel ( $\text{dB} = 0.009$ ) van de eerste orde zichtbaar. Calciet, een optisch 1-assig negatief mineraal, heeft een maximale dubbelbreking van 0.18, hier hoort als maximale interferentiekleur 'wit van hoger orde' bij. In het interferentiefiguur zijn diverse orden zichtbaar met in de buitenste rand van het beeld een witte interferentiekleur.

Het bovenstaande verhaal is nog niet geheel compleet. Niet alle ellipsen van doorsnede in het assenbeeld laten de bijbehorende interferentiekleuren zien. De ellipsen waarvan de assen parallel georiënteerd zijn aan de trillingsrichtingen die door polarisator en analysator doorgelaten worden, liggen in de uitdovingsstand. Deze ellipsen, en de cirkel in het midden, vormen gezamenlijk een zwart kruis. Tussen de armen van het kruis in zijn de interferentiekleuren die bij de overige ellipsen horen, de isochromaten, zichtbaar.

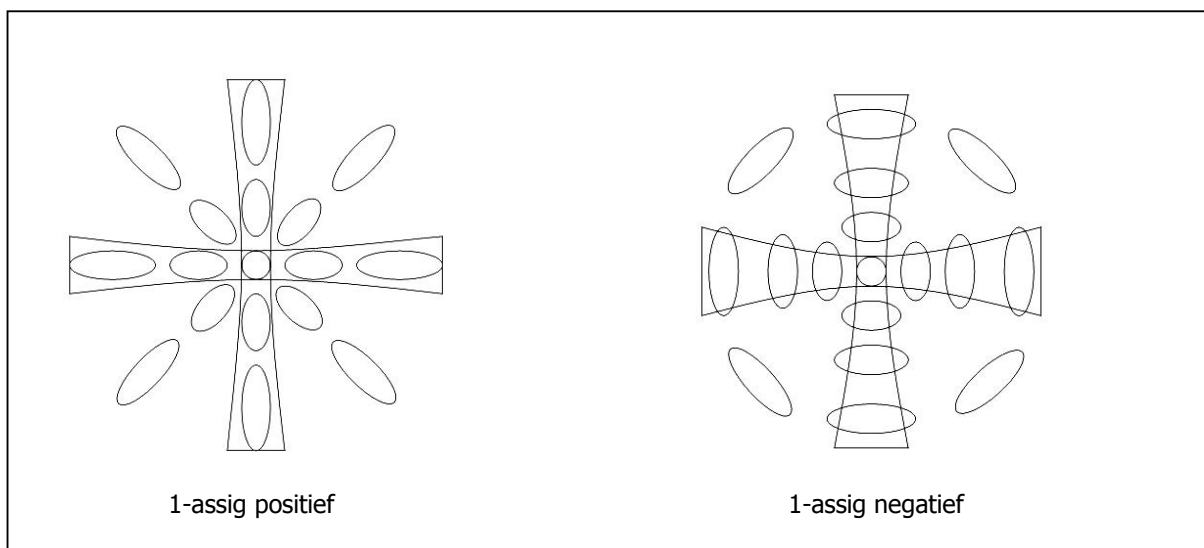


Indien de doorsnede van het mineraal precies parallel aan de cirkelsnede van de indicatrix was, zal bij ronddraaien van de tafel het kruis op zijn plaats blijven. De cirkelsnede blijft bij draaiing op zijn plaats en de ellipsen die in de uitdovingsstand liggen zullen bij draaiing vervangen worden door nieuwe ellipsen die op hun beurt in de uitdovingsstand liggen. Indien de doorsnede niet precies parallel aan de cirkelsnede is zal een excentrisch kruis ontstaan. Hoe schever de snede ten opzichte van de cirkelsnede is des te excentrischer zal het kruis zijn: bij draaiing van de tafel draait het centrum van het kruis rond het centrum van het beeld. De snede kan zo slecht gekozen zijn dat slecht één balk van het kruis zichtbaar is. Bij draaiing van de tafel verschijnen dan ach-

ter elkaar de andere balken van het kruis. Deze balken bewegen of horizontaal van boven naar beneden (of vice versa) of vertikaal van links naar rechts (of vice versa) door het beeld. Hieruit kan de ligging van het centrum van het kruis afgeleid worden. Is duidelijk dat sprake is van een kruis dan is de conclusie dat het assenbeeld behoort tot een optisch 1-assig mineraal.

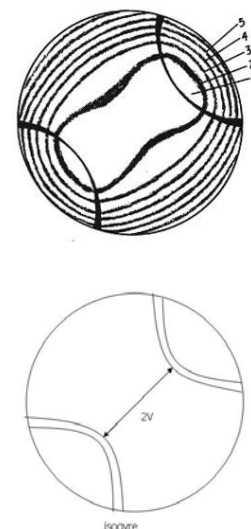
Is de doorsnede van de indicatrix zo gekozen dat deze parallel is aan de optische as dan is de interpretatie van het assenbeeld zeer moeilijk. Bij draaiing van de tafel verschijnen dan op een gegeven moment vage zwarte banden in het beeld die bij draaiing ook weer zeer snel verdwijnen (meestal binnen de  $5^\circ$ ). Een dergelijk assenbeeld wordt een 'flitsfiguur' genoemd. De interpretatie van een flitsfiguur is moeilijk, het is handiger dan een nieuwe, betere, doorsnede te zoeken.

Het op bladzijde 66 afgebeelde assenbeeld behoort toe aan optisch 1-assige positieve mineralen. Ook optisch 1-assig negatieve mineralen geven een vergelijkbaar kruis. Het verschil zit hem in de oriëntatie van de ellipsen van doorsnede. Tijdens het practicum zal ingegaan worden op het bepalen van het optisch teken (positief of negatief) van het assenbeeld hetgeen neerkomt op de bepaling van de oriëntatie van de ellipsen van doorsneden in het assenbeeld.



Figuur 25: de schematische assenbeelden van optisch 1-assige mineralen

Ook van 2-assige mineralen is een interferentiefiguur, of assenbeeld, te maken. Het beste resultaat wordt verkregen indien de snede zó gekozen is dat deze ofwel loodrecht op de  $n_z$  staat, indien sprake is van een optisch positief mineraal, ofwel loodrecht op de  $n_x$  staat, indien sprake is van een optisch negatief mineraal. Het is tevens van belang dat de hoek tussen de optische assen ( $2V$ ) niet groter is dan circa  $60^\circ$  (deze waarde is afhankelijk van het type microscoop dat gebruikt wordt). In het ideale geval ontstaat een assenbeeld zoals hiernaast is getekend. Het assenbeeld wordt ook nu gevormd door ellipsen van doorsnede. Daar nu sprake is van twee optische assen is in het assenbeeld op twee plaatsen een cirkel als ellips van doorsnede aanwezig. Daarnaast liggen een aantal ellipsen in de uitdovingsstand. De cirkelsneden en de ellipsen in de uitdovingsstand leveren met ingeschakelde analysator twee gebogen zwarte banden op: deze worden isogyren genoemd. In het midden van de isogyren, op de punten met de sterkste kromming, bevinden zich de cirkelsneden, dit zijn de afbeeldingen van de twee optische assen. Rond deze afbeeldingen van de optische assen neemt de ellipticiteit van de ellipsen van doorsnede toe, zoals bij de optisch 1-assige mineralen. De bijbehorende interferentiekleuren veroorzaken ook nu gekleurde banen, isochromaten (1 t/m 5).

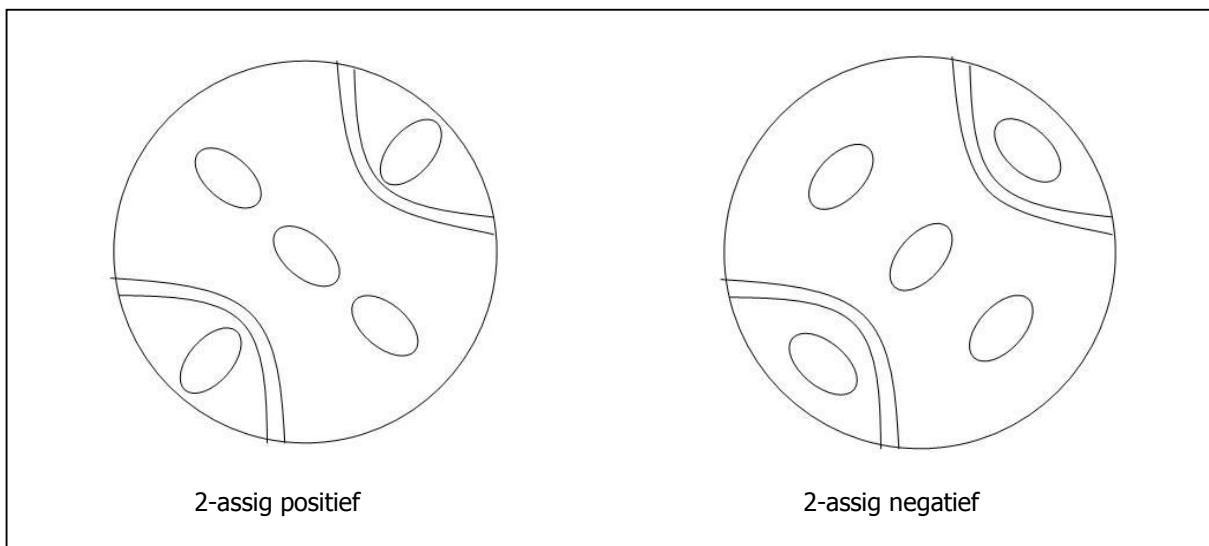


De cirkelvormige isochromaten die rond de twee optische assen ontstaan, gaan op een gegeven moment overlappen waardoor de isochromaten geen cirkels meer zijn maar ovaalvormig worden. De optische assenhoek,  $2V$ , wordt weergegeven door de afstand die aanwezig is tussen de twee cirkelsneden.

Als aan de tafel gedraaid wordt, verandert het assenbeeld van 2-assige mineralen aanzienlijk. De ellipsen die de isogyren vormen krijgen een interferentiekleur en andere ellipsen komen in de uitdovingsstand te liggen. Bij draaiing ontstaat langzamerhand een kruis. Verwarring met het assenbeeld van 1-assige mineralen is dan mogelijk. Het kruis dat ontstaat bij 2-assige mineralen verandert bij verdere draaiing van de tafel echter weer in twee gescheiden isogyren. Ook is één van de balken van het 2-assige kruis veel breder dan de andere; en zijn de isochromaten niet in mooie cirkels rond het centrum van het kruis gepositioneerd. Maar, het is dus zaak om altijd even aan de tafel te draaien voor een conclusie getrokken wordt. Blijft het assenbeeld een kruis, dan is zeker sprake van een 1-assig mineraal; verandert het kruis in twee isogyren dan is zeker sprake van een 2-assig mineraal.

In de praktijk is het niet gemakkelijk een mooi assenbeeld van een 2-assig mineraal te maken daar het moeilijk is hiervoor de goede snede te vinden. Wel is het vaak mogelijk een snede te vinden die loodrecht op één van de twee optische assen staat, deze blijft namelijk zwart bij ronddraaien (cirkelsnede!). In het assenbeeld is dan slechts één van de isogyren te zien. De kromming van de isogyre maakt onderscheid met een rechte balk van een 1-assig kruis mogelijk. Aangezien het middelpunt van een isogyre altijd naar de andere isogyre 'wijst' is het ook nu mogelijk in gedachten een compleet beeld van het assenbeeld te krijgen.

Twee-assige positieve en negatieve mineralen geven een vergelijkbaar assenbeeld. Voor de bepaling van het optisch teken is het wederom van belang te letten op de oriëntatie van de ellipsen van doorsnede. Hoe deze oriëntatie bepaald kan worden komt tijdens het practicum ter sprake. Indien slechts één isogyre zichtbaar is, is aan de kromming van deze isogyre te zien waar de andere zich bevindt. Ook dán is het mogelijk het optisch teken te bepalen. De afstand tussen de afbeeldingen van de twee optische assen geven informatie over de hoek tussen de optische assen,  $2V$ . Indien slechts één isogyre aanwezig is kan uit de kromming van de isogyre  $2V$  bepaald worden. Hoe sterker de kromming van de isogyren des te kleiner is  $2V$  en des te kleiner is de afstand tussen de isogyren. Bij mineralen waarbij de assenhoek  $90^\circ$  is liggen de isogyren zeer ver uit elkaar. De isogyren zijn dan ook geen gekromde banden meer maar kaarsrecht. Een overzicht van het verband tussen de kromming van de isogyren en de assenhoek wordt tijdens het practicum besproken (zie 5.8.9).



*Figuur 26: de schematische assenbeelden van optisch 2-assige mineralen*

## 5.7. Overige optische eigenschappen

Bij de optische determinatie van mineralen spelen meer eigenschappen een rol dan in de voorgaande paragrafen aan de orde zijn gekomen. Ook eigenschappen als de kleur, de splijting, het reliëf, uitdovingsverschijnselen e.a. zijn belangrijk tijdens de determinatie. Gezien deze eigenschappen in de praktijk min of meer voor zichzelf spreken komen deze tijdens het practicum aan de orde.



## 5.8. Practicum optische mineralogie (ta1900 – deel 4)

De volgende (optische) eigenschappen komen aan bod:

- 5.8.1. kleur en pleochroïsme
- 5.8.2. splijting en splijtingshoek
- 5.8.3. dubbelbreking, gangverschil en interferentiekleur
- 5.8.4. reliëf
- 5.8.5. (relatieve) brekingsindex
- 5.8.6. kristalvorm, tweelingsvormen
- 5.8.7. omzetting, verwerking
- 5.8.8. uitdoving en uitdovingshoek
- 5.8.9. interferentiefiguur (assenbeeld), optisch teken, assenhoek
- 5.8.10. overigen: de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas

Deze eigenschappen zullen uitgelegd worden voor zover dat nog niet in eerdere hoofdstukken gebeurd is. Per eigenschap wordt tevens vermeld hoe de microscoop ingesteld moet worden om de eigenschap te kunnen bestuderen. Ook worden per eigenschap één of meerdere oefeningen opgegeven. De mineralen die tijdens dit practicumonderdeel aan bod komen zijn tevens de belangrijkste gesteentevormende mineralen. Belangrijkste doel van dit onderdeel is het kunnen vaststellen van de optische eigenschappen van mineralen. Het is echter tevens de bedoeling dat na afloop van dit onderdeel de belangrijkste gesteentevormende mineralen herkend of gedetermineerd kunnen worden. Tijdens het tentamen dat bij dit practicumonderdeel hoort moeten van drie mineralen, die zich in een gesteente bevinden, de optische eigenschappen bepaald worden. Een voorbeeld van het tentamen is te vinden op blz. 7. Dit tentamenformulier zal tijdens het practicum als leidraad fungeren

### 5.8.1. Kleur en pleochroïsme

De optische kleur van een mineraal is afhankelijk van de brekingsindex van het mineraal en de mate waarin licht geabsorbeerd wordt. Deze eigenschap is afhankelijk van de oriëntatie van het mineraal. De optische kleur van een mineraal wordt bekeken terwijl de analysator is uitgeschakeld. Schakelen we de analysator in dan zien we de interferentiekleur, hetgeen heel wat anders is. Veel mineralen vertonen geen duidelijke kleur: deze mineralen noemen we kleurloos, door de microscoop bekeken zien ze er transparant, wittig of grijs uit. Er zijn echter mineralen die duidelijk een bruine, groene of een andere kleur hebben, deze kleur is belangrijk. Draaiing van het mineraal ten opzichte van het invallende gepolariseerde licht kan een kleurverandering teweeg brengen, er is dan sprake van pleochroïsme (meerkleurigheid), het mineraal is pleochroïtisch. De pleochroïtische kleuren zijn veelal karakteristiek: zij moeten in de beschrijving van het mineraal vermeld worden. Het zal bij de bestudering van de kleur van mineralen opvallen dat er mineralen zijn die ondoorzichtig zwart zijn, deze zwarte kleur verandert niet bij ronddraaien. We hebben hier niet te maken met zwarte mineralen maar met mineralen die zelfs bij een dikte van 30  $\mu\text{m}$ . ondoorzichtig zijn. Dit zijn zogenaamde 'opake mineralen', deze mineralen kunnen niet onderzocht worden met deze vorm van microscopie.

Instelling microscoop

- analysator uitschakelen
- kleinste of middelste vergroting
- tafel draaien

oefening 1a (dd 1):

In dd 1 zijn diverse mineralen aanwezig. Stel scherp met de kleinste vergroting en gebruik de analysator niet. In dd 1 zijn een aantal kleurloze mineralen aanwezig, een opaak mineraal en een mineraal met een duidelijke kleur. Over het opake mineraal valt verder niets te zeggen, we kunnen hier geen eigenschappen van bestuderen. De kleurloze mineralen zijn voornamelijk veldspaten en kwarts, deze worden later meer in detail bestudeerd. Het bruin gekleurde mineraal is biotiet. Probeer zo veel mogelijk doorsneden van biotiet te vinden en maak een beschrijving van de kleur. Is biotiet pleochroïtisch?

oefening 1b (dd 2):

In dd 2 zijn eveneens veldspaten, kwarts en biotiet aanwezig. Probeer de biotiet in deze dd terug te vinden. In deze dd is nog een mineraal met een duidelijke kleur aanwezig. Dit mineraal is hoornblende. Is hoornblende pleochroïtisch? Beschrijf de kleur van hoornblende.

### 5.8.2. Spletjing en splijtingshoek

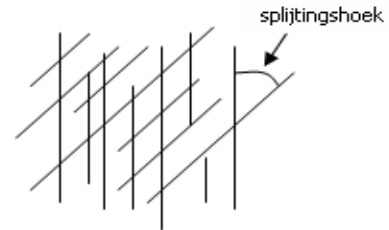
De macroscopisch soms zo moeilijk te herkennen splijting van een mineraal is microscopisch vaak overduidelijk. De splijting van een mineraal is de neiging van het mineraal te breken langs evenwijdig aan elkaar georiënteerde vlakken (zie paragraaf 4.3). Door de microscoop zijn deze barstjes zichtbaar als een set, of meerdere sets, parallelle lijntjes in het mineraal. Een mineraal kan gekarakteriseerd worden door slechts één splijtrichting. Het is ook mogelijk dat meerdere splijtrichtingen aanwezig zijn. Is dit het geval dan is op het kristalvlak waar beide splijtrichtingen aanwezig zijn een hoek tussen deze twee richtingen te bepalen. Dit wordt de splijtingshoek genoemd.

Instelling microscoop

- analysator uitschakelen
- kleinste of middelste vergroting

oefening 2a (dd 1 of dd 2):

Bestudeer de splijting van biotiet in dd 1 of dd 2 en bepaal zonodig de splijtingshoek.



oefening 2b (dd 2):

Bestudeer de splijting van hoornblende in dd 2 en bepaal zonodig de splijtingshoek.

oefening 2c (dd 3):

In dd 3 zijn naast kleurloze en opake mineralen een groen en een lichtbeige gekleurd mineraal aanwezig. Het lichtbeige mineraal vormt relatief grote kristallen, dit is augiet. Bestudeer de kleur van augiet. Is augiet pleochroïtisch? Bestudeer de splijting van augiet en bepaal zonodig de splijtingshoek.

oefening 2d (dd 1):

In dd 1 is het mineraal kwarts aanwezig. Kwarts is een kleurloos mineraal zonder splijting. Over het algemeen bevat kwarts ook geen andere mineralen als insluitsels waardoor het mineraal vaak heel helder lijkt. Probeer kwarts op zoveel mogelijk plaatsen in de dd terug te vinden.

oefening 2e (dd 25):

Een microscoop vergroot. Deze vergroting is te bepalen door de vergroting van oculair en objectief met elkaar te vermenigvuldigen. Ondanks dat de vergroting dus met een duidelijk getal is weer te geven is het vaak moeilijk voor te stellen hoe groot het mineraal dat bestudeerd wordt nu precies is. Tijdens deze oefening is het de bedoeling dat de (halve) diameter van het beeldveld bepaald wordt bij gebruik van de objectieven met respectievelijk de bruine, gele, (groene: een enkele microscoop heeft 4 objectieven) en blauwe ring. Hiervoor wordt dd 25 gebruikt. In deze dd is een centimeter aanwezig die verdeeld is in millimeters. In de laatste millimeter zijn streepjes aanwezig die deze millimeter in tienden verdelen. Stel de schaalverdeling scherp met de lens met de bruine ring, en leg de schaalverdeling evenwijdig aan één van de kruisdraden. Bepaal de diameter van het (halve) beeldveld en schrijf dit getal onder op. Herhaal dit voor de lens met de gele ring. Voor de bepaling van de diameter van het beeld met de lens met de blauwe ring moet eerst een 1/10-de millimeterstreep exact in het midden gelegd worden, daar de diameter van het beeld veel minder is dan 1 mm. Als er in het beeld niets te zien is, omdat de streepjes gewoon niet in beeld zijn, is het moeilijk scherp stellen! Schrijf alle getallen duidelijk op. Deze beeldgrootte kan gebruikt worden voor een bepaling van de grootte van de mineralen in het preparaat.

Lens met bruine ring:    diameter beeldveld:

Lens met gele ring:     diameter beeldveld:

Lens met groene ring:   diameter beeldveld:

Lens met blauwe ring:   diameter beeldveld:

### 5.8.3. Dubbelbreking, gangverschil en interferentiekleur

De theorie over deze onderwerpen is besproken in de paragrafen 5.3, 5.4 en 5.5.

De kleuren die mineralen met uitgeschakelde analysator vertonen vallen vaak in het niets bij de kleuren die verschijnen als de analysator wordt ingeschakeld. Deze kleuren worden interferentiekleuren genoemd. Ze zijn het gevolg van allerlei brekings- en interferentieverschijnselen die het gevolg zijn van de interactie tussen mi-

neralen en licht in de microscoop en hebben niets te maken met de (pleochroïtische) kleur van het mineraal. Interferentiekleuren ontstaan in alle mineralen die anisotroop zijn

Instelling van de microscoop:

- kleinste of middelste vergroting
- analysator inschakelen

oefening 3a (dd 1):

In dd 1 is kwarts aanwezig (zie oef. 2d). Bestudeer en beschrijf de interferentiekleur van zoveel mogelijk kwartsdoorsneden in de dd. Hebben alle doorsneden dezelfde interferentiekleur? Probeer nu met behulp van de kleurenkaart van Michel-Lévy (blz. 120) en de uitleg bij figuur 24 op pagina 63 vast te stellen wat nu de hoogste interferentiekleur van kwarts is. Welk maximaal gangverschil hoort hierbij en wat is de maximale dubbelbreking van kwarts?

oefening 3b (dd 2):

Bestudeer zoveel mogelijk doorsneden van hoornblende in dd 2. Beschrijf de interferentiekleuren. Probeer met de kleurenkaart van Michel-Lévy vast te stellen wat de hoogste interferentiekleur van hoornblende is. Welk maximaal gangverschil hoort hierbij en wat is de maximale dubbelbreking?

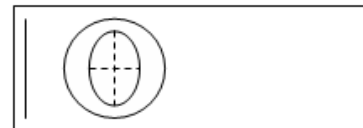
oefening 3c (dd 3):

Als oefening 3b; bestudeer echter nu augiet in dd 3.

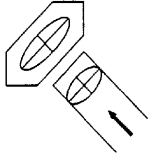
Bij het uitvoeren van oefeningen 3a t/m 3c is waarschijnlijk gebleken dat het niet altijd even eenvoudig is om de interferentiekleur goed te interpreteren. De kleuren van de eerste orde zijn gemakkelijk te herkennen. De kleuren van de tweede en derde orde lijken echter zeer veel op elkaar. Er zijn twee mogelijkheden om de exacte interferentiekleur te bepalen.

Soms zijn in de dd doorsneden van het mineraal te vinden die een wigvormige begrenzing hebben: de dikte neemt naar het midden van het kristal toe (de dB blijft gelijk!). Aangezien het gangverschil afhankelijk is van de dikte en de dubbelbreking, neemt ook het gangverschil naar het midden toe en dus ook de interferentiekleur. Van buiten naar binnen is dan een deel van de kleurenkaart van Michel Lévy zichtbaar: de hoogste interferentiekleur kan gewoon afgelezen worden.

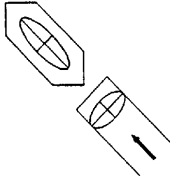
Door een eenvoudige 'truc' zijn de interferentiekleuren echter ook te manipuleren waardoor de keuze vaak gemakkelijker wordt. Voor deze manipulatie wordt gebruik gemaakt van een comparator, een hulpplaatje. Dit hulpplaatje bestaat uit een smalle metalen of plastic strip waarin aan één kant een venster aanwezig is. In dit venster is een dun plaatje van het mineraal kwarts (of gips) aanwezig. De kwarts is zodanig georiënteerd dat de langste as van de ellips van doorsnede parallel ligt aan de korte zijde van het metalen of plastic plaatje. De lange as van de ellips van doorsnede wordt doorgaans met een streep op het metaal of plastic aangegeven. De dikte van de kwarts in het venster is zó gekozen dat de interferentiekleur hiervan overeenkomt met de roodpaarse kleur die de overgang van de eerste naar de tweede orde karakteriseert. Deze kleur wordt 'rood eerste orde' genoemd. Tijdens het practicum zal doorgaans niet gesproken worden over 'comparator' of over 'hulpplaatje' maar kortweg over 'kwartsplaatje' (of 'het  $\lambda$ -plaatje'). In de microscoop is een gleuf aanwezig waar het kwartsplaatje ingeschoven kan worden. Indien geen dd op de tafel aanwezig is kan de interferentiekleur van het kwartsplaatje bestudeerd worden door de analysator in te schakelen.



Indien van deze methode gebruik wordt gemaakt wordt eerst het mineraal in de 45°-stand (helderste interferentiekleuren) gedraaid en worden de kleuren goed bekeken. Voor de oriëntatie van de ellips van doorsnede in het mineraal zijn nu twee mogelijkheden (welke?). Bij het inschuiven van het kwartsplaatje (met een constante oriëntatie van de ellips van doorsnede en een constante interferentiekleur) vindt een kleurverandering plaats. De interferentiekleur van het kwartsplaatje (rood eerste orde, of  $1\lambda$ ) wordt óf bij de interferentiekleur van het mineraal opgeteld óf er van afgetrokken. Naast de daadwerkelijke interferentiekleur zijn dus ook gemanipuleerde interferentiekleuren te bestuderen die ofwel een orde hoger ofwel een orde lager zijn. Of de gemanipuleerde kleur een orde hoger is of een orde lager is afhankelijk van de oriëntatie van de ellips van doorsnede van het mineraal in de dd. Met behulp van de schematische tekeningen op de volgende bladzijde (bladzijde 72) kan de juiste conclusie getrokken worden over de wijze waarop de kleur veranderd is.



**additie:** de kleuren verschuiven een orde omhoog. De lange as van de ellips van doorsnede in het mineraal ligt evenwijdig aan de lange as van de ellips van doorsnede van de kwarts in het kwartsplaatje.



**subtractie:** de kleuren verschuiven een orde omlaag. De korte as van de ellips van doorsnede in het mineraal ligt evenwijdig aan de lange as van de ellips van doorsnede van de kwarts in het kwartsplaatje.

Misschien is na éénmaal het kwartsplaatje ingeschoven te hebben al duidelijk tot welke orde de gemanipuleerde kleur behoort, en kan vervolgens direct gezegd worden wat de daadwerkelijke interferentiekleur was. Is dit nog niet duidelijk verwijder dan het kwartsplaatje en draai de tafel, en dus het mineraal op de tafel, vervolgens  $90^\circ$ . De ellips van doorsnede draait natuurlijk mee en komt in de andere  $45^\circ$ -stand te liggen. Met ingeschoven kwartsplaatje zal nu het tegengestelde effect zichtbaar zijn. Liet de eerst handeling additie zien dan zal de tweede handeling subtractie laten zien en omgekeerd.

Met deze manipulatie zijn binnen één doorsnede interferentiekleuren die tot twee of drie orden behoren te bestuderen. Deze combinatie van orden maakt een juiste bepaling van de eigenlijke interferentiekleur vaak zeer gemakkelijk, zeker als binnen deze drie orden de eerste orde, met zijn afwijkende kleuren, aanwezig is. Nogmaals in het kort de handelingen:

#### Handelingen:

- Draai het mineraal in de  $45^\circ$ -stand en bestudeer de interferentiekleur.
- Schuif het kwartsplaatje in en bestudeer opnieuw de interferentiekleur. Treedt additie of subtractie op?
- Schuif het kwartsplaatje er uit en draai het mineraal  $90^\circ$ . Het mineraal bevindt zich nu in de andere  $45^\circ$ -stand. De oriëntatie van de ellips van doorsnede is meegedraaid, de lange en korte as zijn met andere woorden van plaats verwisseld. De dubbelbreking en de interferentiekleur blijven hetzelfde. Schuif het kwartsplaatje er weer in en bestudeer de nieuwe interferentiekleur. Treedt additie of subtractie op? Ten opzichte van de vorige waarneming met ingeschoven kwartsplaatje moet nu een tegengesteld effect zichtbaar zijn.
- Met behulp van de waarnemingen en de kleurenkaart op bladzijde 120 is nu de daadwerkelijke interferentiekleur en het bijbehorende gangverschil precies vast te stellen.

oefening 3d (dd 2 en dd 3):

Controleer met behulp van één van de bovengenoemde methoden de maximale interferentiekleur van hoornblende (dd 2) en augiet (dd 3).

oefening 3e (dd 7):

In dd 7 bevindt zich een kleurloos mineraal met één duidelijke splijtingsrichting. Dit mineraal is muscoviet. Met ingeschakelde analysator vertoont muscoviet duidelijke, felle interferentiekleuren. Bepaal de maximale interferentiekleur, het bijbehorende gangverschil en de maximale dubbelbreking van muscoviet.

oefening 3f (dd 7):

Bestudeer muscoviet in de uitdovingsstand: valt iets speciaals op? Dit verschijnsel wordt 'bird's eye structure' (vogeloojjes structuur) genoemd. Dit verschijnsel is karakteristiek voor glimmers (zie ook biotiet in dd 1).

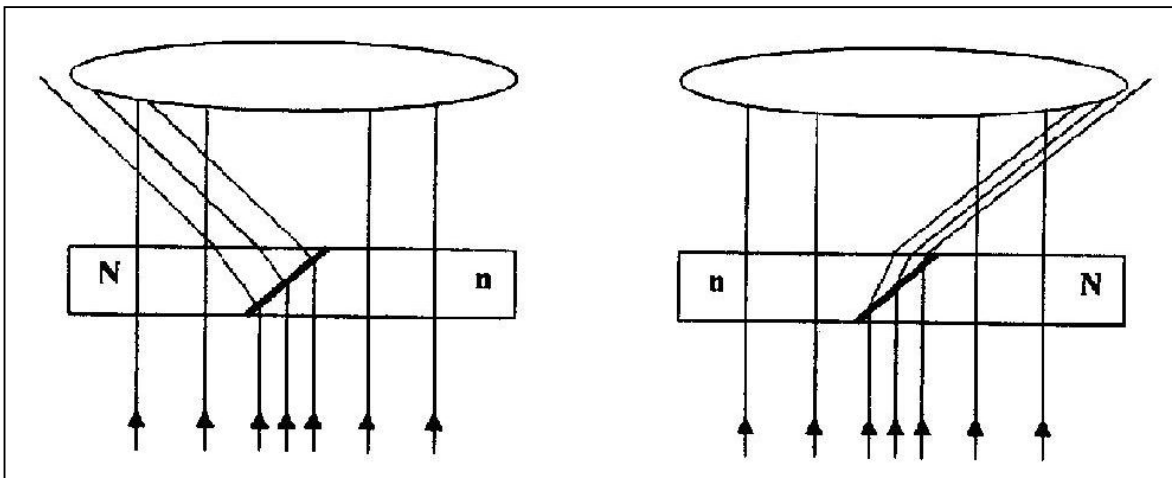
oefening 3g (dd 11):

In dd 11 is calciet het hoofdmineraal. Wat is de maximale interferentiekleur en de maximale dubbelbreking van calciet?

#### 5.8.4. Reliëf

De eigenschap reliëf wordt bekeken zonder gebruik van de analysator. Om deze eigenschap in kaart te brengen wordt gekeken naar de buitenste begrenzing van kristallen of korrels. Deze kristal- of korrelgrenzen zien er niet altijd hetzelfde uit. Soms zijn de begrenzingen niet of nauwelijks zichtbaar: de kristallen steken niet tegen elkaar af. Soms echter zijn de grenzen tussen de kristallen wel zichtbaar: een duidelijke zwarte lijn is aanwezig. Deze zwarte lijn kan variëren in dikte. Door de aanwezigheid van deze lijn lijkt er een hoogteverschil tussen de kristallen aanwezig te zijn. Er is geen hoogteverschil aanwezig, de dikte van de dd is immers overal 30  $\mu\text{m}$ . Dit schijnbare hoogteverschil wordt 'reliëf' genoemd. Het reliëf wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een brekingsindexverschil tussen de aangrenzende mineralen. Hoe groter het verschil tussen de brekingsindices van de mineralen des te dikker de zwarte lijn tussen de mineralen, des te hoger het schijnbare hoogteverschil en dus des te hoger het reliëf.

Het reliëf van mineralen is niet goed te zien als de grensvlakken tussen de kristallen precies loodrecht op de dd staan. Zodra de grenzen echter scheef door de dd lopen, hetgeen vaak het geval is, veroorzaken de loodrecht invallende stralen brekingseffecten op het grensvlak (figuur 27) waardoor een verstrooiing van de lichtstralen optreedt. Met behulp van deze inhomogene stralenverdeling zijn twee eigenschappen van mineralen te bepalen. De eerste eigenschap is het reliëf van mineralen.



Figuur 27: brekingseffecten die optreden op het grensvlak tussen twee mineralen met een verschillende brekingsindex ( $N > n$ ). In deze schematische tekening zijn alleen dd en een objectief weergegeven.

Er ontstaat een concentratie van afgebogen stralen (figuur 27) aan de kant van het mineraal met de hoogste brekingsindex (N). De mate van afbuiging is afhankelijk van de vorm van het grensvlak en van het verschil tussen de brekingsindices van de twee mineralen ( $N - n$ ). Als gevolg van de afbuiging kan het gebeuren dat een aantal van de afgebogen stralen niet meer op de lens, het objectief, valt. Hoe groter het verschil tussen N en n des te meer stralen gaan verloren. Er vallen minder stralen op het beeld van het grensvlak dan de bedoeling was. Het gevolg is dat het beeld van het grensvlak donkerder wordt: er ontstaat een zwart lijntje. Naarmate meer stralen verloren gaan wordt dit zwarte lijntje breder en wordt het reliëf hoger. Dus: hoe dikker, breder, de lijn tussen de mineralen is, des te groter is het verschil tussen N en n, en des te hoger is het reliëf. Let op: het geeft niet aan welk mineraal de hoogste dan wel de laagste brekingsindex heeft!

Bij het beschrijven van het reliëf van een onbekend mineraal is het verstandig de brekingsindex te vergelijken met een bekende brekingsindex. Hiervoor wordt de lijm gebruikt waarmee de dd is vastgeplakt, de canadabalsem. Natuurlijk canadabalsem heeft een brekingsindex van 1.537. Synthetisch canadabalsem, die in recente dd's als lijm gebruikt is, heeft een brekingsindex die helaas varieert, en vaak iets hoger is dan die van de natuurlijke variant. Er kan uitgegaan worden van een brekingsindex van 1.54. We onderscheiden:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| zwak reliëf:        | het verschil tussen n en N is klein: de kristalgrenzen zijn niet of nauwelijks te zien.                 |
| middelmatig reliëf: | het verschil tussen n en N loopt op tot circa 0.1: de kristalgrenzen zijn duidelijk.                    |
| hoog reliëf:        | het verschil tussen n en N loopt op tot circa 0.15: de kristalgrenzen worden gevormd door dikke lijnen. |
| zeer hoog reliëf:   | het verschil tussen n en N is groter dan 0.15: de grenzen zijn zéér dikke lijnen.                       |

Het is mogelijk dat het mineraal waarvan het reliëf bestudeerd wordt niet aan canadabalsem grenst waardoor een vergelijking onmogelijk is. In dat geval kan de brekingsindex ook vergeleken worden met een bekende brekingsindex van een aangrenzend mineraal. Kwarts is hiervoor zeer geschikt. Ten opzichte van canadabalsem heeft kwarts een zeer zwak reliëf:  $n_o = 1.544$ ,  $n_e = 1.553$ .

Instelling van de microscoop:

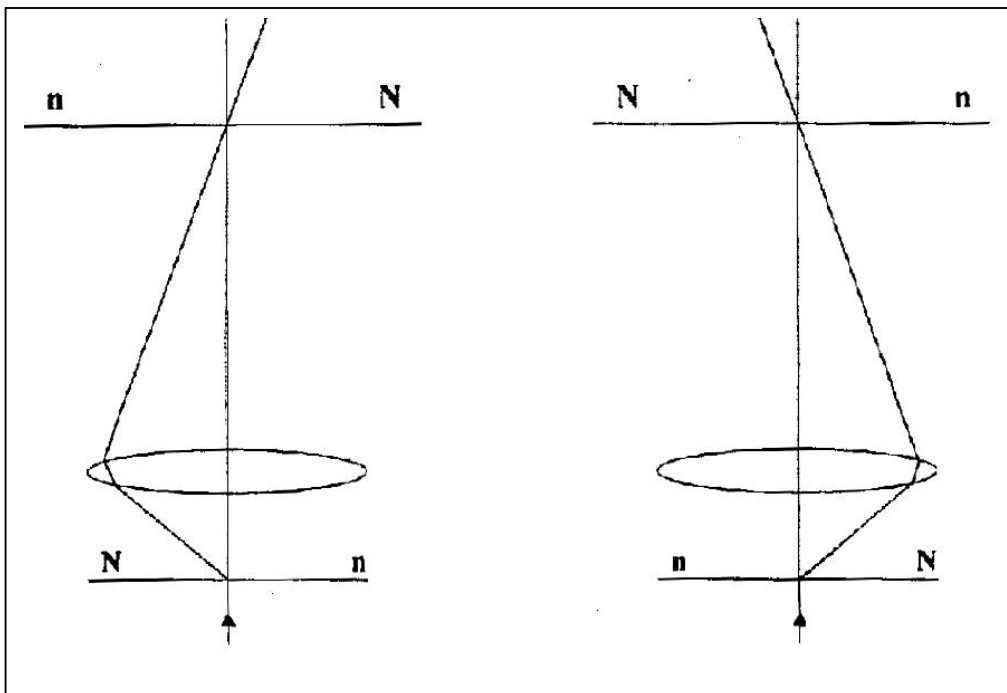
- analysator uitschakelen
- kleinste of middelste vergroting
- diafragma open

oefening 4a (dd 2):

Bepaal het reliëf van biotiet, kwarts en hoornblende.

### 5.8.5. (relatieve) Brekingsindex

In figuur 27 is te zien dat een aantal stralen van richting verandert als sprake is van een scheeflopend grensvlak tussen twee mineralen met een verschillende brekingsindex. Deze qua richting afwijkende stralenbundel is in figuur 28 als één lijn getekend. In figuur 28 wordt vereenvoudigd weergegeven waar deze verhoogde concentratie lichtstralen zich in de tubus van de microscoop bevindt. De stralen die verloren zijn gegaan, en andere effecten zoals bijvoorbeeld de dubbelbreking, zijn in deze tekening weggelaten. Ook is alleen het eerste beeld boven het objectief weergegeven. Deze afwijkende stralenbundel, met een verhoogde concentratie aan lichtstralen, kan gebruikt worden voor de bepaling van de relatieve brekingsindex, er kan met andere woorden bepaald worden welke van de twee mineralen de hoogste dan wel de laagste brekingsindex heeft. Dit is plezierig, omdat dan in combinatie met het bepaalde reliëf een indicatie van de brekingsindex van het mineraal gegeven kan worden. Voor de bepaling van de relatieve brekingsindex kunnen diverse methoden gebruikt worden. Tijdens het practicum worden twee methoden gebruikt, de methode van Becke en de methode van Schröder van der Kolk.



*Figuur 28: vereenvoudigde schematische weergave van de verhoogde concentratie lichtstralen die ontstaan is door brekingseffecten die optreden op het grensvlak tussen twee mineralen met een verschillende brekingsindex ( $N > n$ ). Zie figuur 27. In deze schematische tekening zijn alleen de dd met mineralen, objectief en de eerste vergrote afbeelding van de mineralen weergegeven.*

De methode van Becke :

Na breking op het grensvlak tussen de mineralen bevindt de verhoogde concentratie lichtstralen zich aan de kant van het mineraal met de hoogste brekingsindex (zie figuren 27 en 28). Het lenzenstelsel zorgt er voor dat deze lichtstralen precies op het beeld van het grensvlak vallen. De Duitse mineraloog F. Becke heeft in 1893 een methode bedacht om deze verhoogde concentratie lichtstralen zichtbaar te maken. Dit wordt de 'methode van Becke' genoemd. Becke maakte deze concentratie lichtstralen zichtbaar door het beeld iets uit zijn scherpe positie te draaien. Dit kan op twee manieren, door de afstand tussen het objectief (lens) en de dd te vergroten of door deze afstand juist te verkleinen. Bij het onscherp maken van het beeld verschuift de concentratie lichtstralen vanaf de kristalgrens naar binnen of naar buiten en wordt zichtbaar als een dun wit lijntje: 'het lijntje van Becke'. De beweging van het lijntje, gerelateerd aan de bewegingen die gemaakt zijn om het beeld minder scherp te maken geven informatie over de relatieve brekingsindices. De te trekken conclusies zijn samengevat in de bovenste helft van figuur 29.

Een ezelsbruggetje is de volgende uitspraak: bij het vergroten van de afstand tussen de dd en het objectief gaat het lijntje van Becke in het mineraal met de grootste brekingsindex. Hiertegenover staat: bij het verkleinen van de afstand tussen object en objectief gaat het lijntje van Becke in het mineraal met de kleinste brekingsindex. Let op: beide effecten zijn op te roepen!

De methode van Becke is een zeer betrouwbare methode maar kan problemen opleveren indien de brekingsindices van twee aangrenzende mineralen elkaar gaan naderen. Door dispersieverschijnselen kunnen twee lijntjes van Becke (de dubbele lijn van Becke) ontstaan in plaats van maar één. Deze twee lijnen gedragen zich tegengesteld. Bij het onscherp maken van het beeld gaat de ene lijn naar binnen en de andere lijn juist naar buiten. Dubbele lijnen kunnen ook ontstaan als het beeld van het grensvlak te veel uit zijn scherpe positie gedraaid wordt. Soms lukt het dus niet om met behulp van het lijntje van Becke een uitspraak over de brekingsindex te doen. Vandaar dat ook een tweede methode gebruikt wordt.

Instelling van de microscoop voor 'de methode van Becke':

- analysator uitschakelen.
- vaststellen wanneer bij onscherpstelling de afstand tussen tafel met dd er op en objectief groter of kleiner wordt (bij de meeste microscopen wordt de afstand tussen dd en lens groter als de scherpstelknop naar je toe gedraaid wordt).
- grensvlak scherp stellen met middelste vergroting.
- diafragma deels sluiten (bij afwezigheid hiervan: het gehele condensersysteem iets naar beneden draaien).
- zéér langzaam uit de scherpe stand draaien, opletten of de afstand tussen dd en objectief groter of kleiner wordt.
- indien het lijntje van Becke verschijnt een conclusie trekken met behulp van figuur 29.

oefening 5a (dd 4):

In dd 4 bevindt zich één kristal van orthoklaas, ingebed in canadabalsem. Is de brekingsindex van orthoklaas hoger of lager dan de canadabalsem? Wat is het reliëf van orthoklaas? Wat is de brekingsindex van orthoklaas?

De methode van Schröder van der Kolk.

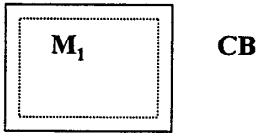
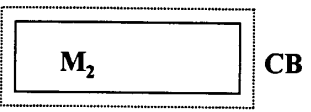
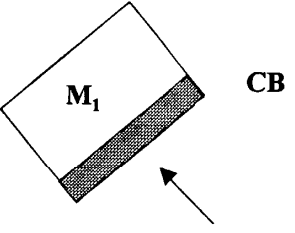
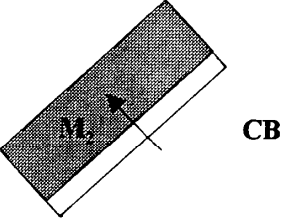
Deze methode wordt ook de 'scheve belichtingsmethode' (oblique illumination method) genoemd. Deze methode kent eveneens twee effecten: de concentratie lichtstralen wordt in het beeld óf zichtbaar gemaakt óf juist verwijderd. Om deze effecten te bewerkstelligen wordt in de tubus van de microscoop een voorwerp in de stralengang geschoven. Hiervoor wordt het plastic of metalen uiteinde van het kwartsplaatje gebruikt. Indien het kwartsplaatje langzaam in de stralengang geschoven wordt is in het beeld de schaduw van dit kwartsplaatje zichtbaar. Als deze schaduw het beeld van het grensvlak nadert zijn twee effecten mogelijk:

- Het grensvlak wordt donker voordat de schaduw van het kwartsplaatje het grensvlak bereikt heeft. Dit betekent dat het kwartsplaatje de verhoogde concentratie lichtstralen in de tubus onderschept heeft.
- De schaduw van het kwartsplaatje valt over het beeld van het grensvlak maar ondanks deze schaduw blijft het grensvlak als een heldere lijn zichtbaar. Dit betekent dat het kwartsplaatje de concentratie lichtstralen dus nog niet onderschept heeft: de concentratie lichtstralen bevindt zich kennelijk aan de andere kant in de tubus. Bij het doorschuiven van het kwartsplaatje zal deze concentratie lichtstralen op een gegeven moment ook onderschept worden en pas dan wordt de afbeelding van het grensvlak donker.

Uit deze effecten kan afgeleid worden waar het mineraal met de hoogste dan wel de laagste brekingsindex zich bevindt. De te trekken conclusies zijn samengevat in figuur 29

Instelling van de microscoop voor de 'methode van Schröder van der Kolk':

- analysator uitschakelen
- grensvlak scherpstellen met de middelste vergroting.
- het grensvlak diagonaal in het beeldveld leggen, zodanig dat deze evenwijdig ligt aan de begrenzing van de schaduw van het kwartsplaatje.
- diafragma deels sluiten (bij afwezigheid hiervan: het gehele condensorsysteem iets naar beneden draaien).
- het kwartsplaatje heel langzaam naar binnen schuiven. In dit geval wordt alleen de buitenste rand van het kwartsplaatje gebruikt, het venster met daarin de kwarts is nu niet belangrijk. De schaduw van de rand van het kwartsplaatje is in het beeld zichtbaar.
- Vergelijk de waarnemingen met figuur 29 en trek je conclusie

	Vergroten afstand d.d. - objectief :	Vergroten afstand d.d. - objectief :
<b>BECKE</b>		
	Becke lijntje schuift naar binnen; dus : $n_{M1} > n_{cb}$	Becke lijntje schuift naar buiten; dus : $n_{M2} < n_{cb}$
<b>SCHRÖDER VAN DER KOLK</b>		
	Grensvlak wordt bij nadering schaduw voortijdig donker, dus : $n_{M1} > n_{cb}$	Grensvlak blijft onder schaduw helder verlicht, dus : $n_{M2} < n_{cb}$

*hulpfiguren voor de bepaling van de relatieve brekingsindex.*

..... = lijntje van Becke

➔ = bewegingsrichting van de schaduw van het kwartsplaatje

*Figuur 29: hulpfiguur voor de bepaling van de relatieve brekingsindex met behulp van de methode van Becke of de methode van Schröder van der Kolk.*



oefening 5b (dd 4):

Bepaal de relatieve brekingsindex van orthoklaas in dd 4 met de methode van Schröder van der Kolk.

Met zowel de methode van Becke als die van Schröder van der Kolk is vast te stellen welk mineraal de hoogste of de laagste  $n$  heeft. Door een mineraal met een onbekende brekingsindex te vergelijken met de canadabalsem, of met een mineraal met een bekende brekingsindex, en de uitkomst te combineren met het reliëf van het mineraal is het mogelijk een schatting te maken van de absolute brekingsindex van het onbekende mineraal. De brekingsindex in combinatie met de dubbelbreking is een zeer sterk determinatiekenmerk. Als bijlage, bladzijde 119, is een grafiek opgenomen waarbij deze twee gegevens tegen elkaar zijn uitgezet. Deze grafiek is uiterst nuttig indien onbekende mineralen bestudeerd worden.

oefening 5c

Maak een schatting van de brekingsindex van kwarts (dd 1), biotiet (dd 2), hoornblende (dd 2) en calciet (dd 11).

### 5.8.6. Kristalvorm, tweelingsvormen

Tijdens het practicum ta1900 – deel 3 is veel aandacht besteed aan de identificatie van de kristalvorm van de mineralen. Microscopisch is de bepaling van de kristalvorm niet altijd mogelijk. Mineralen hebben in gesteenten soms de mogelijkheid gehad om euhedrische kristallen te ontwikkelen. Deze kristallen kunnen in de dd mooie doorsneden opleveren waarin duidelijk een kristalvorm te herkennen is. Granaat bijvoorbeeld vormt meestal euhedrische kristallen: in een dd zijn vaak zes- of achthoekige doorsneden te zien. Ook hoornblende en augiet vormen vaak subhedrische of euhedrische kristallen. In dd 2 en dd 3 zijn deze vormen terug te vinden: er zijn langgerekte, prismatische, doorsneden te vinden, of juist doorsneden loodrecht hierop waarin de kopse doorsnede van de kristallen en de dubbele splijting goed te zien is. Deze kristalvormen zijn tijdens andere oefeningen al aan de orde gekomen en worden nu niet apart besproken.

Ook is bij de macroscopische determinatie van mineralen het begrip tweeling reeds ter sprake gekomen (paragraaf 3.8). Een tweeling is een wetmatige vergroeiing in een mineraal. In een dd is dit vergroeiingsvlak vaak zichtbaar als een lijn: aan weerszijden van deze lijn zijn de optische eigenschappen van het kristal afwijkend (bijvoorbeeld de splijting of de interferentiekleur).

Instelling van de microscoop:

- kleinste of middelste vergroting.
- een ingeschakelde analysator geeft het beste beeld.

oefening 6a (dd 2 of dd 13):

In de dd's 2 en 13 is veel plagioklaas aanwezig. Plagioklaas heeft een karakteristieke lamellaire tweelingsvorm. Bestudeer de tweelingsvorm van plagioklaas en bepaal tevens de kleur, de interferentiekleur, de dubbelbreking, het reliëf en de brekingsindex van het mineraal.

oefening 6b (dd 1 of dd 6):

Als oefening 6a, echter nu voor het mineraal microklien (dd 1 of 6). Microklien wordt gekarakteriseerd door twee lamellaire tweelingsvormen die zo goed als haaks op elkaar staan. Hierdoor is, met ingeschakelde analysator, een 'rasterstructuur' of 'dambordstructuur' zichtbaar. Soms vertoont microklien 'sliertjes' met een andere interferentiekleur en een andere uitdovingsstand, deze zijn het gevolg van ontmenging (perthiet ontmenging: zie bij de macroscopische beschrijving van alkali-veldspaten, blz. 53-54).

oefening 6c (dd 1 of dd 6):

Als oefening 6a, echter nu voor het mineraal orthoklaas (dd 1 of 6). Orthoklaas is te herkennen aan zijn lage brekingsindex ( $n_o < n_{cb}$ ). Daarnaast laat orthoklaas soms enkelvoudige tweelingsvormen zien (o.a. volgens de Karlsbad- en de Bavenowet: zie bij de macroscopische beschrijving van de alkaliveldspaten). Ook orthoklaas laat soms, net als microklien, een 'sliertjesstructuur' zien die het gevolg is van ontmenging (perthiet ontmenging). Deze 'sliertjes' zijn karakteristiek voor alkaliveldspaten (een enkele keer komen ze ook voor in plagioklaas, ze zijn dan echter vaak zo klein dat ze nauwelijks waarneembaar zijn.).

### 5.8.7. Omzetting, verwerking

Mineralen zijn chemische verbindingen. Deze kunnen met andere woorden chemische reacties ondergaan. Deze chemische reacties kunnen als gevolg van diverse processen optreden. Het gevolg van een dergelijke reactie ('omzetting') kan zijn dat in het oorspronkelijke mineraal allemaal kleine kristallen van een ander mineraal zichtbaar zijn. In enkele gevallen is dit een karakteristiek kenmerk van het mineraal.

Instelling van de microscoop:

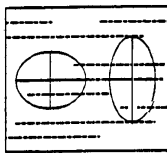
- kleinste of middelste vergroting
- een uitgeschakelde analysator geeft meestal het beste beeld.

oefening 7:

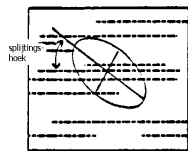
Bestudeer de omzetting van orthoklaas in dd 1, 4 of 6, de omzetting van microklien in dd 6 en de omzetting van plagioklaas in dd 6. Bepaal van microklien tevens alle eigenschappen die tot nu toe besproken zijn.

### 5.8.8. Uitdoving en uitdovingshoek

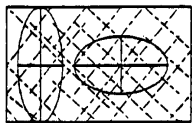
In paragraaf 5.4 en 5.6 is de indicatrix ter sprake gekomen en de 'ellips van doorsnede'. De vorm van de ellips van doorsnede is een maat voor de dubbelbreking en de interferentiekleur. De oriëntatie van deze ellips van doorsnede in het mineraal kan ook gebruikt worden voor de verklaring en bepaling van andere eigenschappen. Bij de eigenschappen uitdoving en uitdovingshoek wordt de oriëntatie van de ellips van doorsnede gekoppeld aan de splijting. Dit komt in de praktijk neer op een vergelijking tussen de oriëntaties van de langste as van de ellips van doorsnede en de splijting. De volgende situaties kunnen onderscheiden worden :



Rechte uitdoving: de splijtlijnen lopen evenwijdig aan één van de assen van de ellips van doorsnede. De andere as van de ellips staat loodrecht op de splijtlijnen.



Scheve uitdoving: de splijtlijnen maken een hoek met de assen van de ellips van doorsnede. De hoek tussen de lange as van de ellips van doorsnede en de splijtlijnen wordt de uitdovingshoek genoemd.



Symmetrische uitdoving: de assen van de ellips van doorsnede lopen evenwijdig aan de deellijnen van twee sets splijtlijnen. Deze uitdoving kan alleen optreden als twee splijtrichtingen aanwezig zijn.

Bij welke mineralen is rechte, scheve of symmetrische uitdoving te verwachten ?

- |                         |   |
|-------------------------|---|
| Triklieen stelsel:      | In minimaal twee oriëntaties scheve uitdoving   |
| Monoklieen stelsel:     | In de sneden evenwijdig aan $\{010\}$ is scheve uitdoving aanwezig; in de overige sneden is een rechte en/of symmetrische uitdoving aanwezig. |
| Orthorhombisch stelsel: | Rechte en/of symmetrische uitdoving.  |
| Trigonaal stelsel :     | Rechte en/of symmetrische uitdoving   |
| Tetragonaal stelsel:    | Rechte en/of symmetrische uitdoving   |
| Hexagonaal stelsel:     | Rechte en/of symmetrische uitdoving   |
| Kubisch stelsel:        | Niet van toepassing   |

Instelling van de microscoop:

- Kleinste of middelste vergroting
- Analysator uitschakelen
- Splijtlijnen evenwijdig aan één van de kruisdraden leggen. Op de rand van de tafel is een gradenverdeling aangebracht. Bij het ijkstreepje de stand opnemen (let op: bij de meeste microscopen loopt de gradenverdeling van 0 tot 36 en niet tot 360, dan dus het getal vermenigvuldigen met 10!).

- Analysator inschakelen en eventueel draaien tot de uitdovingsstand bereikt is. (Uitdoving treedt op indien de assen van de ellips van doorsnede parallel lopen aan de kruisdraden!) De uitdovingshoek is de hoek waarover gedraaid is. Deze hoek is te bepalen door nogmaals de gradenstand bij het ijkstreepje af te lezen en de waarden van elkaar af te trekken.
- De hoek tussen de lange as van de ellips van doorsnede en de splijtlijnen geeft de uitdovingshoek die in de literatuur vermeld staat. Bepaal ter controle waar de lange as van de ellips van doorsnede zich bevindt indien sprake is van scheve uitdoving

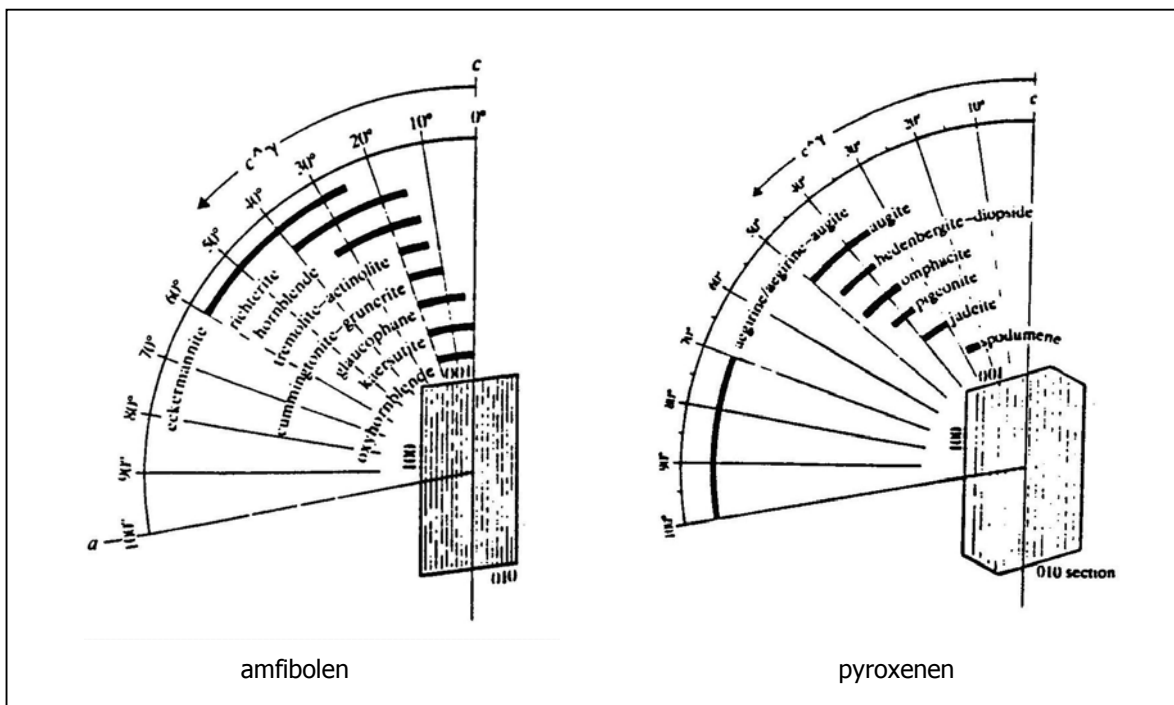
oefening 8a

Bepaal de uitdoving van biotiet (dd 1 en 2) en muscoviet (dd 7).

oefening 8b

Bepaal de uitdoving van hoornblende (dd 2) en augiet (dd 3), en

Bepaal de uitdovingshoek van hoornblende (dd 2) en augiet (dd 3) en vergelijk deze met figuur 30.



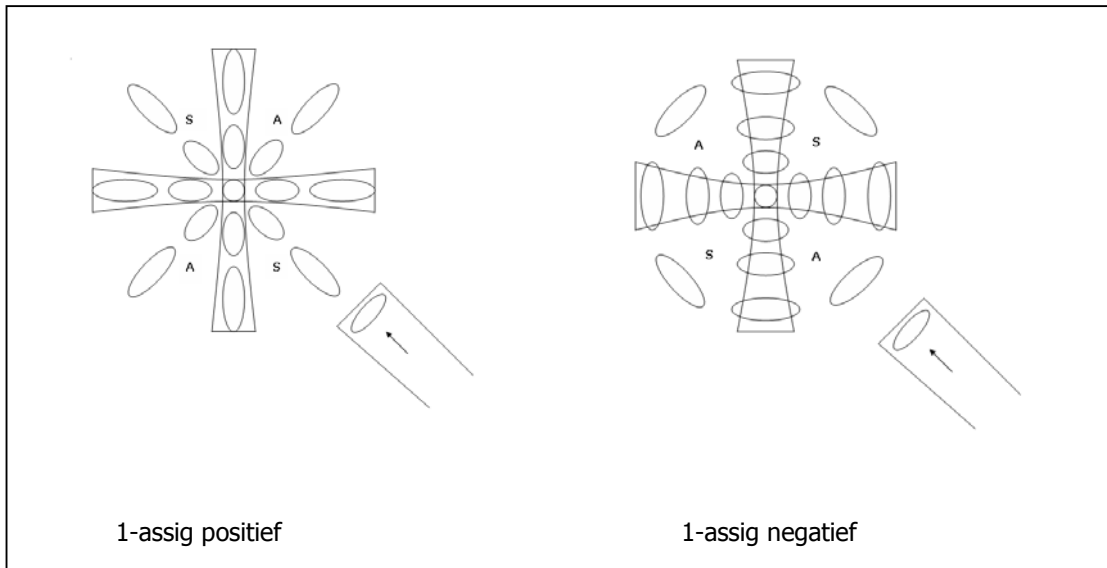
Figuur 30: uitdovingshoeken van amfibolen en pyroxenen

### 5.8.9. Interferentiefiguur (assenbeeld), optisch teken, assenhoek

In paragraaf 5.6 is de bijbehorende theorie uitgelegd - zie aldaar.

Optisch 1-assige mineralen geven als assenbeeld een kruis indien de doorsnede van het mineraal loodrecht op de optische as georiënteerd is. Zodra de doorsnede niet meer precies loodrecht op de optische as genomen is ontstaat een assenbeeld met een excentrisch kruis. Hoe schever de doorsnede des te excentrischer het kruis en des te moeilijker de interpretatie. Het maken van een goed en duidelijk assenbeeld is vaak moeilijk en een tijdrovende bezigheid.

Optisch 1-assige positieve mineralen en optisch 1-assig negatieve mineralen geven een vergelijkbaar assenbeeld, onderscheid is te maken door te letten op de oriëntatie van de ellipsen van doorsnede. De oriëntatie van de ellipsen is te bepalen door te letten op de kleurveranderingen die optreden na het inschuiven van het kwartsplaatje. Door het kwartsplaatje in te schuiven is vast te stellen waar additie en subtractie optreden (zie voor de uitleg van deze begrippen bladzijde 72). Door de optredende kleurverandering te relateren aan de oriëntatie van de ellipsen (zie figuur 31) is het optisch teken (hiermee wordt positief of negatief bedoeld) eenvoudig vast te stellen



Figuur 31: hulpfiguren voor de bepaling van het optisch teken (+ of -) van optisch 1-assige mineralen

Instelling van de microscoop:

- Het is van essentieel belang een goede doorsnede te zoeken!!! Een snede die, met ingeschakelde analysator, helemaal zwart blijft bij ronddraaien van de tafel is ideaal. Is deze snede niet te vinden zoek dan naar een snede die zo donker mogelijk blijft bij ronddraaien. Let op 1: met uitgeschakelde analysator is deze snede niet zwart! Let op 2: ook de canadabalsem is met ingeschakelde analysator zwart!
- Diafragma geheel open
- Extra condensor (de zogenaamde 'klapcondensor') inschakelen. Controleer of deze klapcondensor de dd raakt. Zo ja, draai dan het hele condensorsysteem ietsje naar beneden, tot dat de klapcondensor de dd niet meer raakt. Zo nee, controleer of het condensorsysteem zo hoog mogelijk staat. De klapcondensor vervolgens weer wegklappen!
- Analysator uitschakelen (scherpstellen op een kleur is moeilijk).
- Leg de snede in het midden van het beeld en stel deze scherp met respectievelijk de kleinste, middelste en grootste vergroting (blijf bij het scherpstellen met de grootste vergroting aan de tafel draaien zodat scherp gesteld kan worden op ronddraaiende stofjes, barstjes, ed.).
- Analysator inschakelen
- De klapcondensor inschakelen
- Lens van Bertrand inschakelen

oefening 9a (dd 9):

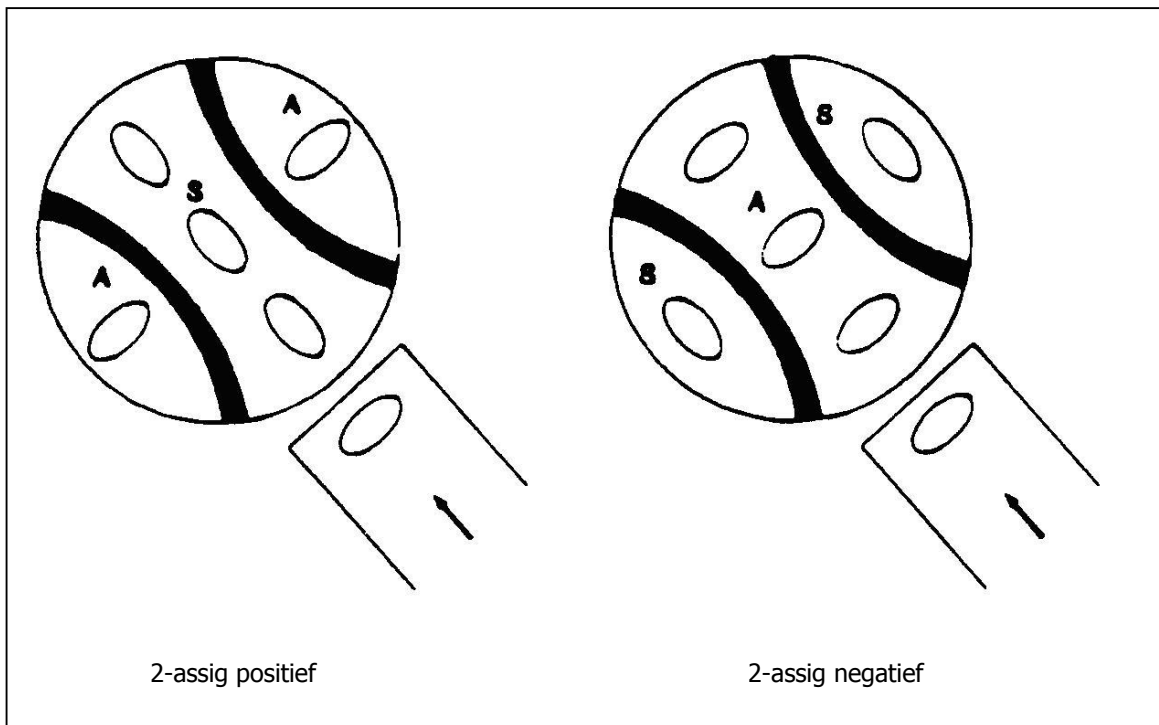
Maak een assenbeeld van kwarts en gebruik hiervoor de dd waarin een georiënteerde snede van kwarts  $\perp$  C-as aanwezig is (dd 9). Bepaal het optisch teken. Wat is de maximale interferentiekleur in het assenbeeld?

oefening 9b (dd 10):

Maak een assenbeeld van calciëet en gebruik hiervoor de dd waarin een georiënteerde snede van calciëet  $\perp$  C-as (dd 10) aanwezig is. Bepaal het optisch teken. Wat is de maximale interferentiekleur in het assenbeeld?

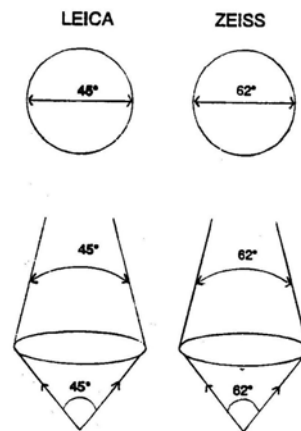
Ook van 2-assige mineralen is een assenbeeld te maken. Twee-assige positieve en negatieve mineralen geven een vergelijkbaar assenbeeld. Voor de bepaling van het optisch teken is het weer van belang te letten op de oriëntatie van de ellipsen van doorsnede in het assenbeeld. Deze oriëntatie kan bepaald worden met behulp van het kwartsplaatje zoals bij de 1-assige mineralen. Zie figuur 32.

Het is niet eenvoudig om een doorsnede te vinden die loodrecht op de scherpe hoek tussen de optische assen staat. Een assenbeeld waarin twee isogyren zichtbaar zijn is dan ook zeer moeilijk te maken.

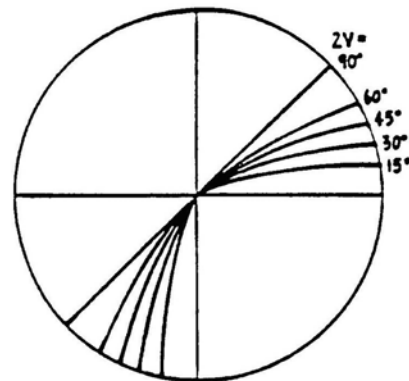


Figuur 32: hulpfiguren voor de bepaling van het optisch teken (+ of -) van optisch 2-assige mineralen

De hoek tussen de optische assen is direct te bepalen indien beide isogyren zichtbaar zijn in het assenbeeld. De afstand tussen de afbeeldingen van de beide optische assen (punten met de sterkste kromming in de isogyren) geeft informatie over de hoek tussen de optische assen doordat de afmeting van het beeldveld gerelateerd is aan de grootte van het objectief, en deze hangt af van het merk microscoop. Tijdens het practicum zijn zowel Zeiss microscopen als Leica microscopen in gebruik. Hoe groter het objectief des te groter het beeld, des te groter de hoek tussen de assen die afgebeeld kan worden. De volgende gegevens zijn van belang:



Uit de kromming van de isogyre is tevens een schatting van de assenhoek te maken. Hoe sterker de kromming van de isogyren des te kleiner is 2V en des te kleiner de afstand tussen de isogyren. Bij mineralen waarbij de assenhoek 90° is liggen de isogyren zeer ver uit elkaar. De isogyren zijn dan ook geen gekromde banden meer maar kaarsrechte balken. Een overzicht van de verband tussen de kromming van de isogyren en de assenhoek wordt in het nevenstaand figuurtje schematisch aangegeven



Instelling van de microscoop:

De handelingen die verricht moeten worden voor het maken van een assenbeeld van 2-assige mineralen komen overeen met de handelingen voor 1-assige mineralen. Ook nu is het van essentieel belang een goede doorsnede van het mineraal te vinden. Het is over het algemeen vrij moeilijk om die snede te vinden die loodrecht op de scherpe deellijn van de hoek tussen de optische assen staat. Het is gemakkelijker een snede te vinden die loodrecht op één van de optische assen staat, dit is immers een cirkelsnede van de indicatrix. Deze snede blijft, met ingeschakelde analysator, zwart bij ronddraaien van de tafel. In de praktijk komt het er op neer dat ook bij 2-assige mineralen gezocht moet worden naar een snede die zo donker mogelijk blijft bij ronddraaien van de tafel, dus naar een snede met zo laag mogelijke interferentiekleuren.

oefening 9c (dd 12):

Maak een assenbeeld van muscoviet en gebruik hiervoor de dd waarin een georiënteerde snede van muscoviet evenwijdig aan {001} aanwezig is (dd 12). Bepaal het optisch teken en 2V.

oefening 9d (dd 5):

Maak een assenbeeld van diopsiet en gebruik hiervoor de dd waarin een georiënteerde snede van diopsiet  $\perp$  C-as aanwezig is (dd 5). Bepaal het optisch teken en 2V.

Het interferentiefiguur, het optisch teken en de assenhoek geven zeer specifieke informatie over (de indicatrix van) het mineraal. In de bijlage op bladzijde 119 zijn de meest gangbare mineralen in een grafiek uitgezet. Op de assen van de grafiek staan de dubbelbreking en de brekingsindex uitgezet. Per mineraal staat óók aangegeven of het mineraal optisch 1- of 2-assig is, negatief of positief, en de eventuele assenhoek. Deze grafiek is met andere woorden zeer nuttig indien men van een onbekend mineraal de naam wil achterhalen.

oefening 9e:

Maak zoveel mogelijk assenbeelden van zoveel mogelijk verschillende mineralen (b.v. dd 1, 2 of 3).

#### 5.8.10. Bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas

Plagioklaas is een gemakkelijk te herkennen mineraal. Tijdens oefening 6a (blz 77) is de karakteristieke lamellaire tweelingsvorm al bestudeerd. Het is mogelijk om door middel van de bepaling van de hoeken tussen de lange assen van de ellipsen van doorsneden in de twee sets lamellen (albiet-wet) de chemische samenstelling van de plagioklaas te bepalen (%An). Deze methode staat uitgelegd in de bijlagen 3 en 4 (blz. 116, 117).

Oefening 10:

Bepaal de chemische samenstelling van de plagioklaas in dd 2, dd 11 en dd 13.

#### Het tentamen ta 1900 – deel 4:

Een voorbeeld van het tentamenformulier is te vinden op bladzijde 7. Tijdens het tentamen mag gebruik gemaakt worden van een aantal figuren die ter plekke uitgedeeld worden. Het gaat om de volgende figuren: hulpfiguur voor de bepaling van de relatieve brekingsindex (fig. 29), figuur met de uitdovingshoeken van amfibolen en pyroxenen (fig. 30), hulpfiguren voor de interpretatie van assenbeelden (fig. 31 en 32), het n-db diagram (bijlage 6), plagioklaasgrafiek (grafiek met %An uitgezet tegen uitdovingshoek lamellen – bijlage 4) en de kleurenkaart van Michel Lévy (bijlage 7).

Als voorbereiding op het tentamen is de volgende oefening van belang

oefening 11:

Probeer van zoveel mogelijk mineralen in een gesteenteplaatje een complete beschrijving te maken. Dat wil zeggen: probeer van elk mineraal alle besproken eigenschappen te beschrijven. Probeer daarna de naam van het mineraal te achterhalen óf met behulp van de gemaakte aantekeningen óf met behulp van de gebruikte tabellen en/of grafieken. Gebruik het tentamenformulier op bladzijde 7 als leidraad. Laat de gemaakte beschrijving controleren!

## 6. Gesteenten

### 6.1. Inleiding

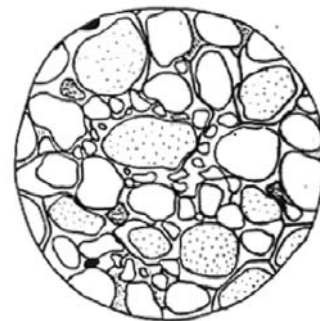
'Een gesteente is een door natuurlijke processen ontstane materie die uit een verzameling mineralen bestaat. Deze mineralen kunnen met elkaar verbonden zijn maar dat hoeft niet. Deze materie vormt uitgestrekte lichamen in de aarde. De gesteenten kunnen uit één mineraal bestaan maar vaker is sprake van verschillende mineralen'. Deze omschrijving is van toepassing op de meeste gesteenten. De naamgeving van de gesteenten berust op de genese, de ontstaanswijze, ervan. De textuur en de mineralogie van een gesteente zijn karakteristiek voor de ontstaanswijze. Als gekeken wordt naar de ontstaanswijzen van gesteenten kan een driedeling gemaakt worden. Onderscheiden worden: magmatische gesteenten, sedimentaire gesteenten en metamorfe gesteenten. Door de textuur en de mineralogie steeds in het oog te houden is het doorgaans niet moeilijk om de drie hoofdgroepen van elkaar te onderscheiden.

### 6.2. De drie hoofdgroepen gesteenten

Magmatische gesteenten zijn die gesteenten die ontstaan zijn door stolling van magma, deze gesteentegroep werd vroeger ook de groep van de 'stollingsgesteenten' genoemd. Tijdens de stolling ontstaan in een willekeurige richting kristallen in de vloeistof. De eerste kristallen die ontstaan zijn vaak euhedrisch, de laatste kristallen vullen de laatste open plekken op en zijn anhedrisch. De kristal grootte kan sterk variëren. De tekening hiernaast is een voorbeeld van een ongericht magmatisch gesteente met redelijk grote kristallen. De volgende mineralen zijn algemeen in magmatische gesteenten: olivijn, pyroxenen, amfibolen, glimmers, veldspaten, kwarts, foïden.



Gesteenten die op of vlak onder het aardoppervlak ontstaan, bij de druk en temperatuur (tot  $\pm 200^\circ$ ) die daar heersen, worden sedimentaire gesteenten genoemd. Dit is een zeer grote groep gesteenten. De bekendste zijn zandsteen en kalksteen, maar ook steenzout, steenkool en bauxiet zijn sedimentaire gesteenten. Zandstenen zijn opgebouwd uit korreltjes die transport ondergaan hebben en daarna gecementeerd zijn (zie tekening hiernaast). Kalkstenen bestaan vaak uit deeltjes die afkomstig zijn van organismen met een kalkskelet. De mineraalinhoud van sedimentaire gesteenten kan sterk variëren. Kwarts is een algemeen mineraal in zandsteen; calciet en dolomiet zijn de belangrijkste mineralen in kalksteen.



Metamorfe gesteenten zijn die gesteenten die een gedaanteverandering, een metamorfose, ondergaan hebben. Deze verandering vindt plaats onder invloed van veranderende fysische condities (de druk en de temperatuur zijn de belangrijkste factoren) terwijl het gesteente in vaste toestand blijft en heeft betrekking op de textuur en de mineralogie van het gesteente. Vooral door toename van de druk ontstaat een karakteristieke gerichte textuur die 'foliatie' genoemd wordt; deze is in de tekening hiernaast goed zichtbaar. In metamorfe gesteenten kunnen veel mineralen aanwezig zijn die ook in magmatische en sedimentaire gesteenten algemeen zijn. Daarnaast kunnen mineralen ontstaan die karakteristiek zijn voor metamorfe gesteenten zoals bijvoorbeeld: granaat, andalusiet, kyaniet, sillimaniet, stauroliet en cordieriet.



### 6.3. Magmatische gesteenten

#### 6.3.1. Indeling van de magmatische gesteenten

Magmatische gesteenten worden onderverdeeld in twee groepen. Deze indeling is gebaseerd op de plaats van stolling van het magma. Magma dat diep in de aardkorst stolt levert een gesteente op dat een dieptegesteente genoemd wordt. Dieptegesteenten worden ook plutonische gesteenten of intrusieve gesteenten genoemd. Magma kan echter ook vanuit grotere diepten in de aardkorst stijgen. Door middel van vulkanische activiteit kan het magma het aardoppervlak bereiken of bijna bereiken. We spreken dan niet meer over magma maar over lava. De stolling van lava levert de tweede groep magmatische gesteenten: de vulkanische gesteenten. Vulkanische gesteenten worden ook extrusieve gesteenten genoemd.

Voor de naamgeving van het magmatische gesteente is het van belang te bepalen of het gesteente een dieptegesteente dan wel een vulkanisch gesteente is. Deze twee groepen kunnen we van elkaar onderscheiden door op de textuur te letten.

De textuur van dieptegesteenten of intrusieve gesteenten:

Dieptegesteenten ontstaan door stolling van magma dieper in de aardkorst. Op grotere diepte gaat de afkoeling van het magma zeer langzaam. Dit komt omdat gesteenten slechte warmtegeleiders zijn. De temperatuur van een magma zal tenminste 500 °C bedragen, maar kan oplopen tot ver boven de 1000 °C. De omringende gesteenten zijn ook warm en moeten deze extra warmte afvoeren. Dit is een traag proces. Tijdens de afkoeling ontstaan, bij het passeren van bepaalde drempelwaarden, kristalkiemen van bepaalde mineralen. Deze kristalkiemen groeien langzaam uit tot grotere kristallen. De eerste kristallen die ontstaan hebben vaak hun eigen vorm. De laatste kristallen die ontstaan vullen de gaatjes op en laten geen duidelijke kristalvormen meer zien. Langzamerhand gaat de vloeibare massa over in een vast mengsel van kristallen: het gesteente. Opvallend voor deze dieptegesteenten is de grootte van de kristallen. Er ontstaat tijdens de stolling een gesteente dat relatief grofkristallijn is: het heeft een phaneritische textuur. In de praktijk betekent dit dat we de kristallen met het blote oog, eventueel met een loep, duidelijk kunnen zien.



De textuur van vulkanische gesteenten of extrusieve gesteenten:

Vulkanische gesteenten ontstaan door stolling van lava. De temperatuur van lava die het aardoppervlak bereikt is hoog. De omgevingstemperatuur, de temperatuur van zowel de lucht als de onderliggende gesteenten, is laag. De afkoeling van de lava gaat dientengevolge relatief snel. Lucht wordt verwarmd en gaat stijgen, koude lucht komt hiervoor in de plaats en wordt op zijn beurt verwarmd, etc. Door de snelle daling van de temperatuur van de lava worden de waarden van de temperatuur waarbij de verschillende mineralen gaan kristalliseren in snel tempo overschreden. Er ontstaan min of meer gelijktijdig allemaal kleine kristalkiemen die nauwelijks tijd hebben om uit te groeien. Er ontstaat tijdens de stolling een gesteente dat relatief fijnkristallijn is: het gesteente heeft een aphanitische textuur. In de praktijk betekent dit dat we de kristallen met het blote oog, of met behulp van een loep, niet kunnen zien.



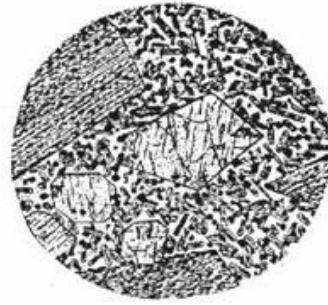
Soms gaat de afkoeling zó snel dat de lava hard wordt terwijl er helemaal geen kristallen ontstaan. Er is sprake van een onderkoelde vloeistof, ofwel van glas. Als glas ontstaat door snelle afkoeling van lava wordt dit vulkanisch glas genoemd. In vulkanische gesteenten kunnen ook poriën aanwezig zijn. In lava zitten vaak gassen en vluchtige bestanddelen opgelost. Als de druk op de lava afneemt doordat de lava in de aardkorst omhoog komt, kunnen deze gassen zich gaan afscheiden en bellen vormen. Deze gasbelletjes



proberen te ontsnappen. De gasbelletjes verdwijnen tenzij de stolling van de lava zó snel plaatsvond dat ze niet op tijd konden ontwijken. Ze worden dan gefixeerd in het stollende gesteente, de gassen verdwijnen en de belletjes blijven als poriën in het gesteente achter.

Fenokristen, porfierische textuur:

Zowel in de relatief grofkristallijne dieptegesteenten als in de relatief fijnkristallijne vulkanische gesteenten zijn soms extra grote kristallen te zien, kristallen die vaak vele malen groter zijn dan de 'normale' grootte van de kristallen in de matrix van het gesteente. Deze relatief grote kristallen worden fenokristen (of eerstelingen) genoemd. Indien fenokristen aanwezig zijn wordt gezegd dat het gesteente een porfierische textuur heeft.



Fenokristen in een gesteente geven aan dat de afkoelgeschiedenis van het magma niet constant is geweest. In een magmakamer, diep in de aarde, kan de afkoeling bijvoorbeeld al geleid hebben tot de vorming van kristallen van een mineraal. Deze kristallen hadden al een bepaalde grootte gekregen toen het magma alsnog in de aardkorst ging stijgen om als lava uit te stromen. De resterende lava koelde snel af hetgeen een grote hoeveelheid zeer kleine kristalletjes tot gevolg had. De al op grote diepte gevormde kristallen zijn met het magma mee omhoog gekomen en als relatief grote kristallen opgenomen in het fijnkristallijne gesteente dat op het aardoppervlak door stolling is ontstaan. Het resultaat is een vulkanisch gesteente met een duidelijke porfierische textuur. Dit magma, met daarin al enkele grote kristallen die op grote diepte in de magmakamer zijn uitgegroeid, had ook in de aardkorst kunnen stijgen om vervolgens ergens in de aarkorst, op een ondiepere plaats dus, te blijven steken. Op een diepte waar de temperatuur al beduidend lager was. Door verdergaande kristallisatie ontstaan nu kristallen die kleiner zijn dan de al op grotere diepte gevormde kristallen. Het uiteindelijke resultaat is een dieptegesteente met een duidelijke porfierische textuur.

### 6.3.2. De reactiereeks van Bowen

De naamgeving van zowel dieptegesteenten (intrusieve gesteenten) als vulkanische gesteenten (extrusieve gesteenten) berust op de mineralogie. De mineralen die van belang zijn:

#### Felsische mineralen:

- Alkaliveldspaten (A): orthoklaas en microklien (in dieptegesteenten), sanidien (in vulkanische gesteenten)  
Plagioklaasgroep (P): anorthiet ( $An_{100-90}$ ), bytowniet ( $An_{90-70}$ ), labradoriet ( $An_{70-50}$ ), andesien ( $An_{50-30}$ ), oligoklaas ( $An_{30-10}$ ), albiet ( $An_{10-5}$ ). (zie ook bladzijde 55)  
Kwarts (Q):  $\alpha$ -kwarts,  $\beta$ -kwarts, tridymiet, e.a.  
Foiden (F): nefelien, leuciet, sodaliet e.a.

Mafische mineralen: olivijn, amfibolen (o.a. hoornblende), pyroxenen (o.a. augiet), glimmers (o.a. biotiet, muscoviet), calciet. E.a.

Welke mineralen in een gesteente aanwezig zijn hangt af van een aantal factoren. In de eerste plaats is de chemische samenstelling van het magma belangrijk. Daarnaast kan variatie binnen het stollingsproces een variatie aan mineraalcombinaties opleveren.

Eén van de eerste geologen die zich bezighield met de mineralogische samenstelling van magmatische gesteenten was N.L. Bowen. Bowen bestudeerde in eerste instantie zeer veel verschillende dieptegesteenten. Zijn bevindingen werden later door laboratoriumexperimenten bevestigd. In de gesteenten bestudeerde Bowen vooral de relatie tussen de mineralen aan de hand van hun kristalvorm. Uitgangspunt in zijn studie was dat kristallen die hun eigen kristalvorm laten zien eerder gekristalliseerd zijn in het afkoelende magma dan kristallen die niet hun ideale vorm hebben. Zijn conclusie was dat in een afkoelend magma de mineralen in een vaste volgorde kristalliseren.

Voor de mafische mineralen is de volgorde van kristallisatie in een afkoelend magma als volgt: olivijn, orthopyroxeen (b.v. enstatiet, hyperstheen), clinopyroxeen (b.v. augiet), amfibool (b.v. hoornblende), glimmers (resp. biotiet, muscoviet). Dit wil niet zeggen dat al deze mineralen uiteindelijk aanwezig zullen zijn als al het magma gestold is. Welk mineraal uiteindelijk ontstaat, is afhankelijk van de chemische samenstelling van het magma. Een hypothetisch voorbeeld. Stel dat sprake is van een geheel vloeibaar magma met de samenstel-

ling van hoornblende. Met de chemische elementen die in hoornblende aanwezig zijn kunnen ook de andere mineralen zoals olivijn, pyroxenen en glimmers gevormd worden. Wat gebeurt er als het geheel vloeibare magma langzaam gaat afkoelen? Tijdens de afkoeling zal als eerste het mineraal kristalliseren met de hoogste stollingstemperatuur, nl. olivijn. Olivijn is op dat moment in evenwicht met het magma en de temperatuur. Bij verdergaande afkoeling zullen, bij het passeren van de kristallisatietemperatuur van orthopyroxeen, kristallen van orthopyroxeen ontstaan. Dit mineraal is op dat moment in evenwicht met de temperatuur en de samenstelling van het magma. Door de afkoeling zullen eerder gevormde olivijnkristallen echter instabiel worden, gaan reageren met het magma, en overgaan in het op dat moment stabiele orthopyroxeen. Dit proces herhaalt zich. Bij verdere afkoeling kan een clinopyroxeen kristalliseren. De orthopyroxeen wordt instabiel, reageert met het magma om over te gaan in de stabielere clinopyroxeen. Daalt de temperatuur nog meer dan ontstaat een amfibool, in dit geval hoornblende. Het kristallisatieproces volgt de bovengenoemde volgorde van kristallisatie tot het mineraal ontstaat, in dit voorbeeld hoornblende, dat qua chemische samenstelling identiek is aan de beginsamenstelling van het magma. Op dit moment ontstaan in het resterende magma overal hoornblendekristallen. Eerder gevormde mineralen reageren met het magma om over te gaan in hoornblende. Al het magma kristalliseert als hoornblende, waarna de temperatuur verder gaat dalen. Dit gebeurt in het ideale geval. Er zijn processen denkbaar waardoor kristallisatie van het bovengenoemde magma niet alleen hoornblende oplevert maar ook mineralen als pyroxenen en glimmers.

Voor de felsische mineralen is de volgorde als volgt: plagioklaas (respectievelijk anorthiet, bytowniet, labradoriet, andesien, oligoklaas, albiet), alkaliveldspaten (orthoklaas en microklien in dieptegesteenten of sanidien in vulkanische gesteenten), kwarts. Mineralen uit de groep van de foïden kunnen alleen ontstaan als er te weinig SiO<sub>2</sub> (kwarts) in het chemische systeem aanwezig is. Welke felsische mineralen uiteindelijk aanwezig zijn in het gesteente is in de eerste plaats afhankelijk van de chemische samenstelling van het magma. Het kristallisatiepad is vergelijkbaar met het kristallisatiepad zoals beschreven bij de mafische mineralen.

Bowen bestudeerde natuurlijk ook de relatie tussen de mafische en de felsische mineralen. Dit resulteerde in de zogenaamde 'reactiereeks van Bowen' (± 1950):



Het werk van Bowen was een enorme stap voorwaarts. Men begreep eindelijk wat er precies gebeurde als een magma gaat afkoelen en de mineralen kristalliseren. Onderzoek naar de thermodynamische systemen die in magma's een rol kunnen spelen bevestigden de uitkomsten van Bowen. Wat kunnen we verder met deze reeks? Mineralen die horizontaal naast elkaar staan ontstaan globaal bij dezelfde temperatuur, ze zijn tegelijkertijd stabiel. Afhankelijk van de chemische samenstelling van het magma zijn dus mineralen die naast elkaar staan in hetzelfde gesteente te verwachten. Aan deze combinatie van mineralen kan een gesteentenaam gekoppeld worden. Dit is wel afhankelijk van de plaats van stolling van het magma :

mafische min.	+	felsische min.	=	dieptegesteente	of	vulkanische gesteente
olivijn		plag (An <sub>&gt;90</sub> )		olivijngabbro		
orthopyroxeen		plag (An <sub>70-90</sub> )		noriet (opx gabbro)		
clinopyroxeen		plag (An <sub>50-70</sub> )		gabbro s.s.		bazalt
amfibool		plag (An <sub>30-50</sub> )		dioriet		andesiet
glimmers		plag (An <sub>&lt;30</sub> ), alkali- veldspaten, kwarts		graniet		rhyoliet

De reactiereeks van Bowen geeft informatie over het kristallisatiegedrag van een magma. Het werd duidelijk waarom bepaalde mineralen naast elkaar in een magmatisch gesteente kunnen zitten. Voor het begrip van

magmatische gesteenten werd het een belangrijke kapstok. De bovengenoemde gesteenten zijn veel voorkomende dieptegesteenten en vulkanische gesteenten. Er zijn echter veel méér gesteenten dan met de reeks van Bowen beschreven kunnen worden. De reeks van Bowen is met andere woorden niet bedoeld voor de determinatie van gesteenten, het is slechts een hulpmiddel. Voor de classificatie werd rond 1970 een nieuw systeem opgezet door A. Streckeisen, de QAPF classificatie.

### 6.3.3. De QAPF-classificatie

A. Streckeisen ontwikkelde een classificatiesysteem voor zowel dieptegesteenten als vulkanische gesteenten. Dit systeem is overgenomen door de internationale commissie die zich bezighoudt met de naamgeving van gesteenten. Het systeem van Streckeisen is uitermate geschikt voor het macroscopisch determineren van gesteenten.

Dit classificatiesysteem, het QAPF-classificatiesysteem genoemd, is gebaseerd op de relatieve percentages van de felsische mineralen die in magmatische gesteenten aanwezig kunnen zijn. Er wordt gekeken naar de procentuele verhouding tussen kwarts (Q), alkaliveldspaten (A), plagioklaas (P) en foïden (F) in het gesteente. Een prettige bijkomstigheid is dat in een magmatisch gesteente mineralen uit de Q- en de F-groep niet tegelijkertijd primair kunnen ontstaan. Als kwarts naast nefelien, een foïde, zou ontstaan dan reageren deze twee mineralen onmiddellijk met elkaar om een alkaliveldspaat te vormen (nefelien + kwarts → orthoklaas :  $(K,Na)AlSiO_4 + 2 SiO_2 \rightarrow (K,Na)AlSi_3O_8$ ). Foïden worden daarom ook wel veldspaat-vertalers genoemd, ze ontstaan in een gesteente in plaats van alkaliveldspaten als in het chemische systeem te weinig  $SiO_2$  aanwezig is: deze gesteenten worden onderverzadigde gesteenten genoemd. In een gesteente zitten dus maximaal drie van de vier groepen felsische mineralen. Deze mineralogische gegevens van het gesteente worden uitgezet in de zogenaamde QAPF-diagrammen, of Streckeisen diagrammen (zie blz. 90 en 91). Er bestaat een diagram voor zowel de dieptegesteenten als voor de vulkanische gesteenten.

De diagrammen zijn ruitvormig. Elke ruit is opgebouwd uit twee gelijkzijdige driehoeken. In de bovenste driehoek staan de mineralen uit de kwartsgroep (Q), de alkaliveldspaten (A) en de plagioklaasgroep (P) in de punten van de driehoek uitgezet. In de onderste driehoek staan de mineralen uit de groep van de foïden (F), de alkaliveldspaten (A) en de plagioklaasgroep (P) in de punten van de driehoek uitgezet. De twee gelijkzijdige driehoeken delen de zijde tussen de hoekpunten waarin de alkaliveldspaten (A) en de plagioklaasgroep (P) zijn uitgezet. Binnen de ruit verdelen lijnen de ruit in velden. In elk veld staat een gesteentenaam.

Hoe werken de diagrammen?

Ten eerste moet bepaald worden of sprake is van een dieptegesteente of een vulkanisch gesteente. Het antwoord bepaalt welk diagram gebruikt gaat worden. Vervolgens is het nodig om de percentages van de aanwezige mineralen te bepalen (eventueel met hulp van bijlage 5 op bladzijde 118). Naast felsische mineralen zitten doorgaans ook mafische mineralen in een gesteente. Van alle mineralen wordt het aanwezige percentage bepaald. Het totaal moet uitkomen op 100%. Om het QAPF-diagram te kunnen gebruiken wordt echter alleen gekeken naar de felsische mineralen. Het totaal van de felsische mineralen moet dan gelijk zijn aan 100%. Als het totaal aan felsische mineralen in het gesteente niet gelijk is aan 100% zullen de percentages met een bepaalde factor vermenigvuldigd moeten worden zodat het totaal daarna wel gelijk is aan 100% (normeren op 100). Als in het gesteente kwarts aanwezig is worden de gevonden waarden uitgezet in de bovenste helft van de ruit, in de bovenste gelijkzijdige driehoek. Als er foïden aanwezig zijn worden de gevonden waarden uitgezet in de onderste helft van de ruit. Als alle percentages uitgezet worden volgens het principe van een driehoeksbeoordeling, bevindt het snijpunt van de drie lijnen zich in het veld waarin een gesteentenaam staat. Dit is de naam van het gesteente.

Een voorbeeld

In een dieptegesteente bevinden zich de volgende mineralen: kwarts 10%, orthoklaas 15%, microklien 15%, plagioklaas 20%, biotiet 20% en hoornblende 20%. Ofwel Q: 10%, A: 15% + 15% = 30% , P: 20%, M: 40% . De felsische mineralen vormen samen 60%. Om gebruik te kunnen maken van het QAPF-diagram moeten de percentages van de felsische mineralen herberekend worden tot zij samen 100% zijn.

Dus :  $Q = 100/60 \times 10 = 16.7 \%$   
 $A = 100/60 \times 30 = 50.0 \%$   
 $P = 100/60 \times 20 = 33.3 \%$   
Totaal 100 %

Nu kunnen de nieuwe getallen voor Q, A en P direct uitgezet worden in de bovenste helft van het diagram voor de dieptegesteenten. Het snijpunt van de drie lijnen bevindt zich in het veld waarin de gesteentenaam 'kwartsmonzoniet' staat. Het gesteente is dus een kwartsmonzoniet. Als het gesteente geen dieptegesteente was geweest maar een vulkanisch gesteente met dezelfde verdeling van de felsische mineralen was de naam van het gesteente 'kwartslatiet' geworden.

Voor het gebruik van de diagrammen van Streckeisen geldt een beperking: het totaal aan mafische mineralen mag de 90% niet overschrijden. Indien minder dan 10% aan felsische mineralen aanwezig is en dus meer dan 90% aan mafische mineralen, is sprake van een ultramafisch gesteente. Er bestaan zowel ultramafische dieptegesteenten als vulkanische gesteenten. Ultramafische vulkanische gesteenten zijn echter zeer zeldzaam. De naamgeving van deze bijzondere groep gesteenten berust op de verhouding tussen de aanwezige mafische mineralen (zie paragraaf 6.3.4., bladzijde 89).

In enkele gevallen wordt de naam van het gesteente niet alleen bepaald door de relatieve verdeling van de felsische mineralen. Dit is o.a. het geval in de meest rechtse velden in het diagram voor de dieptegesteenten, dus in de velden waarin zowel de gesteenten dioriet, gabbro en anorthosiet staan. Onderscheid is in dit geval mogelijk door in de eerste plaats te letten op het percentage mafische mineralen en in de tweede plaats te letten op de samenstelling van de plagioklaas (zie de 'voetnoot' in fig 34). Is het percentage aan mafische mineralen kleiner dan 10%, en het gesteente bestaat voornamelijk uit plagioklaas, dan wordt het gesteente een anorthosiet genoemd. Overschrijdt het percentage aan mafische mineralen de 10% dan is de gesteentenaam dioriet indien als plagioklaas een andesien ( $An_{30-50}$ ) aanwezig is, en is de gesteentenaam gabbro indien als plagioklaas een labradoriet of bytowniet ( $An_{50-90}$ ) aanwezig is. Ook in het diagram voor de vulkanische gesteenten is de samenstelling van de plagioklaas belangrijk voor het onderscheid tussen de gesteenten bazalt en andesiet (zie de 'voetnoot' in figuur 35).

De naamgeving van de vulkanische gesteenten is macroscopisch vaak heel erg moeilijk. Dit is uiteraard te wijten aan de geringe grootte van de kristallen. Indien fenokristen aanwezig zijn kunnen deze een indicatie geven van de mineraalinhoud van de matrix. De mineralen in de matrix zijn echter zo klein dat ze met het blote oog of met een loep niet te determineren zijn, om over de bepaling van de percentages van de aanwezige felsische mineralen maar helemaal te zwijgen. Voor een exacte naamsbepaling is men dan aangewezen op een chemische analyse.

#### 6.3.4. Korte beschrijving van de belangrijkste dieptegesteenten (intrusieve gesteenten)

Anorthosiet	Dit dieptegesteente deelt in het QAPF-diagram het veld met dioriet en gabbro. Het gesteente bevat meer dan 90% plagioklaas.
Apliet	Verzamelnaam voor relatief fijnkristallijne dieptegesteenten. Een apliet kan m.b.v. het QAPF-diagram gespecificeerd worden als b.v. een granietapliet, syenietapliet, diorietapliet, gabbroapliet, e.d.. De gesteenten mogen dan ook respectievelijk micrograniet, microsyeniet, microdioriet en microgabbro (= doleriet = diabaas) genoemd worden.
Diabaas	Zie apliet
Dioriet	Dieptegesteente met als hoofdmineralen plagioklaas ( $An_{30-50}$ ) en hoornblende. Naast deze mineralen kan een dioriet kleine hoeveelheden kwarts, biotiet of augiet bevatten. Dioriet bevindt zich in het QAPF-diagram in hetzelfde veld als anorthosiet en gabbro. Is het percentage aan mafische mineralen meer dan 10% en is het anorthietgehalte van de plagioklaas minder dan 50% dan is sprake van een dioriet.
Doleriet	Zie bij apliet
Duniet	Zie bij ultramafisch gesteente
Gabbro	De naam gabbro omvat een aantal gesteenten die in hetzelfde veld staan als de anorthosiet en de dioriet. Plagioklaas is het belangrijkste felsische mineraal. Is het percentage aan mafische mineralen meer dan 10% en is het anorthietgehalte van de plagioklaas meer dan 50% dan is sprake van een gabbro. Naast plagioklaas kunnen olivijn, orthopyroxenen of clinopyroxenen de hoofdmineralen zijn. De volgende onderverdeling wordt gemaakt :

gabbro s.s. Dit is de 'gewone' gabbro, deze gabbro wordt bedoeld als er over 'gabbro' gesproken wordt. De hoofdmineralen in deze gabbro zijn plagioklaas en clinopyroxeen (augiet). Ook olivijn en orthopyroxeen kunnen in kleine hoeveelheden aanwezig zijn.

noriet plagioklaas + orthopyroxeen (= orthopyroxeengabbro)  
 olivijngabbro plagioklaas + olivijn

Graniet Dieptegesteente met als felsische hoofdmineralen kwarts, alkaliveldspaten (orthoklaas en/of microklien) en plagioklaas (An<sub>10-30</sub>). Als mafische mineralen zijn vaak biotiet en/of muscoviet aanwezig. Indien weinig plagioklaas aanwezig is, is sprake van een alkaliveldspaatgraniet.

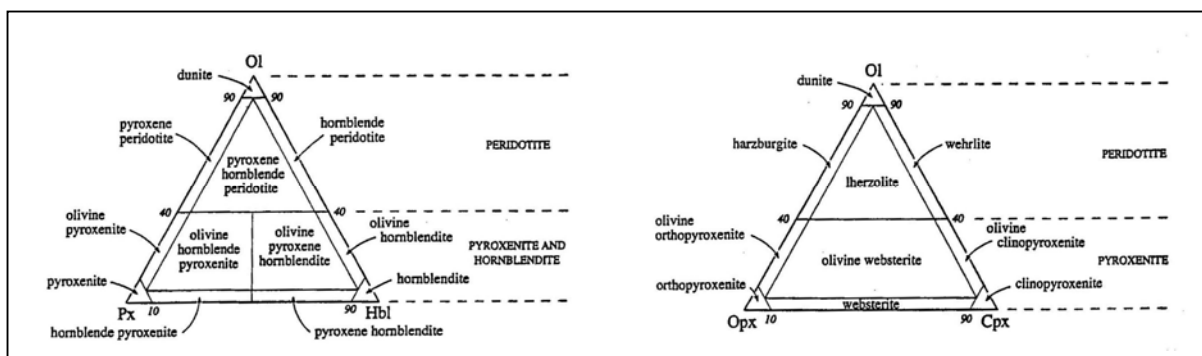
Pegmatiet Pegmatiet is een verzamelnaam voor relatief grofkristallijne dieptegesteenten. Naar de mineralogie kunnen pegmatieten verder onderverdeeld worden. Een granietpegmatiet is een pegmatiet met de samenstelling van graniet, een gabbropegmatiet bevat dezelfde mineralen als een gabbro, et cetera.

Peridotiet Zie bij ultramafisch gesteente

Syeniet Dieptegesteente waarin alkaliveldspaten de belangrijkste felsische mineralen zijn. In mindere mate kunnen plagioklaas, kwarts of foïden aanwezig zijn. Als mafische mineralen kunnen zowel biotiet, hoornblende, augiet als olivijn voorkomen. Afhankelijk van de mineralogische samenstelling bevindt het gesteente zich in de bovenste helft van de ruit (kwarts aanwezig) of in de onderste helft van de ruit (geen kwarts aanwezig, wel foïden aanwezig).

Ultramafische dieptegesteenten Dit is een verzamelwoord voor die dieptegesteenten die meer dan 90% mafische mineralen bevatten. Een onderverdeling is gebaseerd op de verdeling van de mafische mineralen. Gesteenten die meer dan 40% olivijn bevatten worden tot de peridotietgroep gerekend. Bevat het gesteente meer dan 90% olivijn dan wordt de peridotiet ook wel duniet genoemd. Naast olivijn kunnen ook amfibolen of pyroxenen aanwezig zijn. Hoe de naamgeving dan tot stand komt is te zien in onderstaande driehoeken.

Een carbonatiet is een ultramafisch gesteente dat geheel uit carbonaatmineralen is opgebouwd.

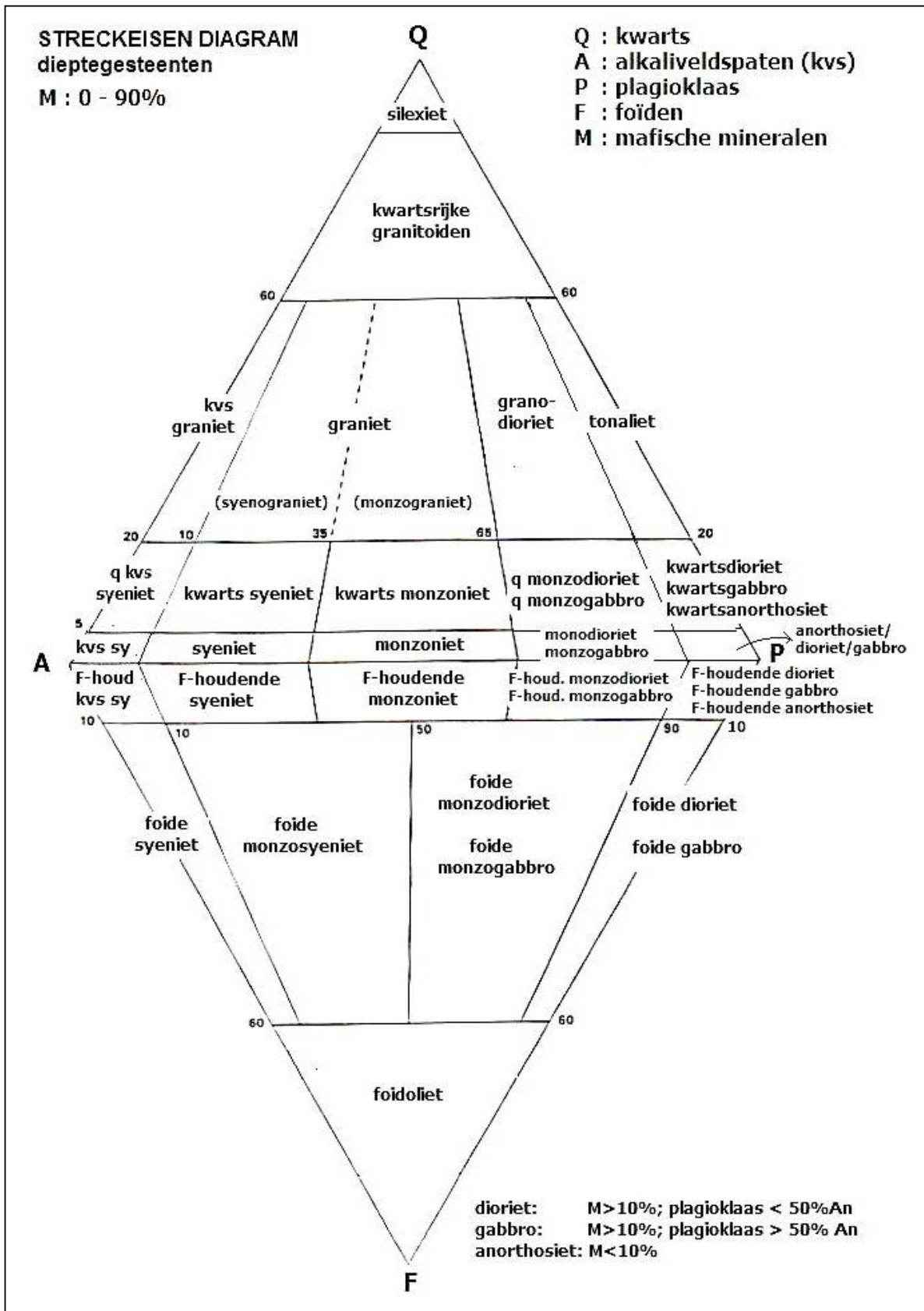


Figuur 33: classificatiediagrammen voor ultramafische gesteenten  
 Bron: Le Maitre et.al. A classification of igneous rocks and glossary of terms (2002)

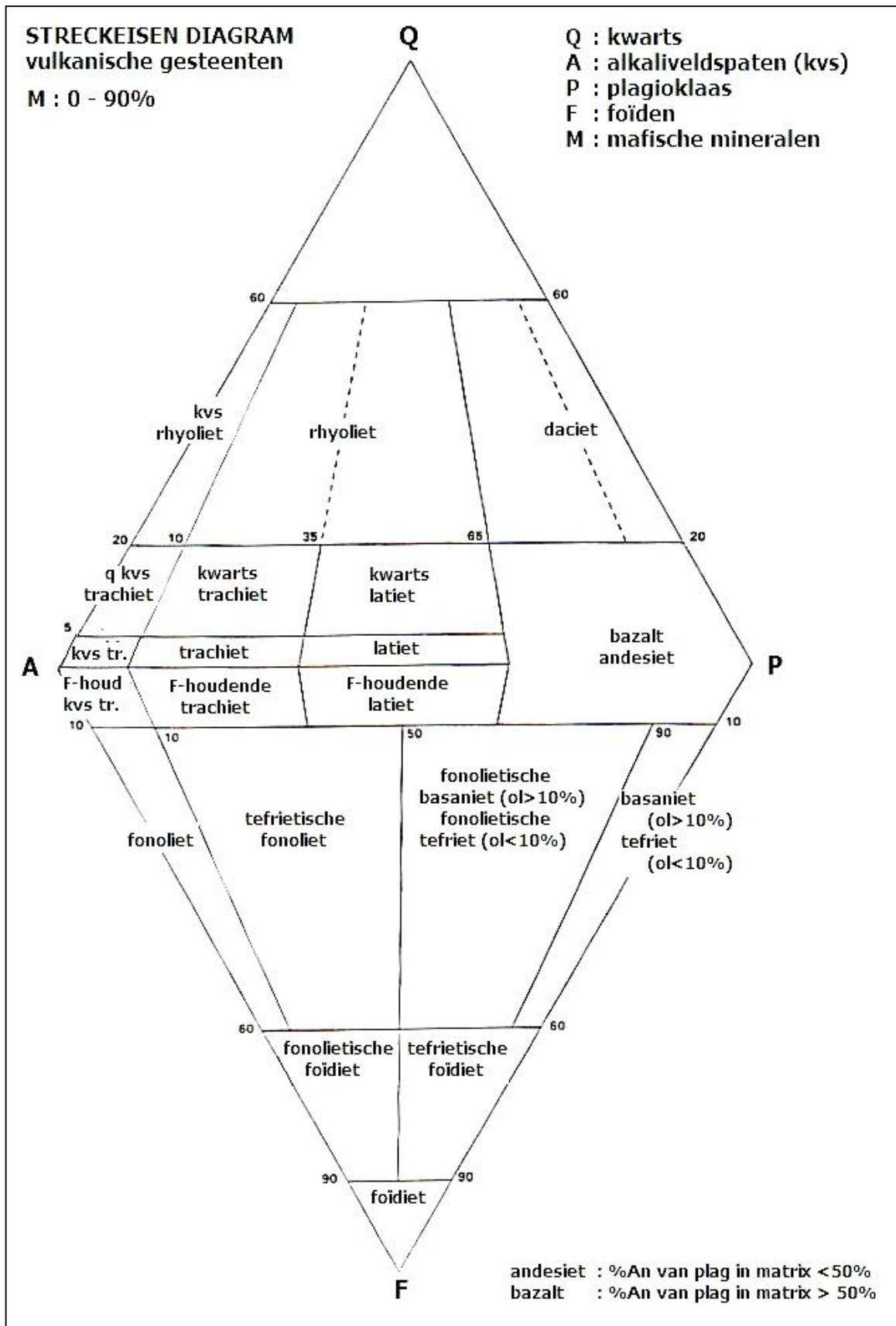
### 6.3.5. Korte beschrijving van de belangrijkste vulkanische gesteenten (extrusieve gesteenten)

Andesiet Vulkanisch gesteente, vaak met een donkergrijze of donkerbruine kleur. Het gesteente bevat als hoofdmineralen plagioklaas (An<sub>30-50</sub>) en hoornblende. Soms zijn enkele kristallen augiet of biotiet zichtbaar.

Basaniet Zie bij tefriet



Figuur 34: het Streckeisen diagram voor dieptegesteenten



Figuur 35: het Streckeisen diagram voor vulkanische gesteenten

Bazalt	Vulkanisch gesteente, vaak met een zwarte kleur. Als hoofdmineralen zijn augiet en plagioklaas (An <sub>50-70</sub> ) aanwezig. Naast deze mineralen kan bazalt kleine hoeveelheden kwarts, foiden, of olivijn bevatten. De olivijn en augiet kunnen aanwezig zijn als fenokristen. De olivijnkristallen zijn te herkennen aan hun groene kleur en hun glazige uiterlijk.
Fonoliet	Dit vulkanische gesteente bevindt zich in de onderste helft van het QAPF-diagram, het gesteente bevat geen kwarts maar wel foiden. Als foiden kunnen nefelien, leuciet, sodaliet, noseaan of haüyn voorkomen. Naast foiden is sanidien (alkaliveldspaat) het belangrijkste mineraal. 'Fono' is afgeleid van 'phonos' hetgeen 'geluid' betekent. In het veld geven fonolieten soms een heldere klank als er met een hamer op geslagen wordt.
Glas	Zie bij vulkanisch glas
Obsidiaan	Zie bij vulkanisch glas
Peksteen	Zie bij vulkanisch glas
Puimsteen	Zie bij vulkanisch glas
Rhyoliet	Vulkanische equivalent van graniet. Het gesteente bevat met andere woorden mineralen als kwarts, alkaliveldspaten (sanidien), plagioklaas en glimmers.
Tefriet	Tefriet is een vulkanisch gesteente dat erg op bazalt lijkt. Vaak is het gesteente iets lichter van kleur. Het gesteente bevindt zich in de onderste helft van het QAPF-diagram, het bevat dus foiden. Vaak is dit leuciet of nefelien. In een tefriet is minder dan 10% olivijn aanwezig. Is meer dan 10% olivijn aanwezig dan wordt het gesteente basaniet genoemd.
Trachiet/latiet	Trachiet en latiet zijn vulkanische gesteenten die, vaak zowel macroscopisch als microscopisch, moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn. In het QAPF-diagram bevinden deze gesteenten zich rond de lijn tussen de A en de P. De gesteenten bevatten geen of nauwelijks kwarts; geen of nauwelijks foiden. Onderscheid is alleen mogelijk door te letten op de verdeling tussen de plagioklaas en de alkaliveldspaten. De geringe grootte van de kristallen maakt het onderscheid tussen latvormige plagioklaas en latvormige sanidien moeilijk, zo niet onmogelijk.
Ultramafische vulk. gesteenten	Ultramafische vulkanische gesteenten zijn zeer zeldzaam. Een voorbeeld van een ultramafisch vulkanisch gesteente is een 'komatiiet'. Dit zeer olivijnrijke gesteente wordt o.a. gevonden bij de Komati rivier in Transvaal, Zuid Afrika. Een carbonatiet is een ultramafisch gesteente dat geheel uit carbonaatmineralen is opgebouwd.
Vulkanisch glas	In vulkanische gesteenten kan glas een belangrijk bestanddeel zijn. Dit komt tot uiting in de benaming: een glashoudende rhyoliet (0-20% glas), een glasrijke rhyoliet (20-50% glas) of een glasachtige rhyoliet (50-80% glas). Is de naam van het gesteente chemisch bepaald dan wordt de aanwezigheid van glas in het gesteente doorgaans aangegeven met het voorvoegsel 'hyalo', b.v. hyalo-rhyoliet. Bevat het gesteente meer dan 80% glas dan krijgt het gesteente een aparte naam: obsidiaan: glas met een zwarte of bruine kleur en een zeer hoge glans, vaak met een schelpvormige breuk, watergehalte < 1%, soms met fenokristen. peksteen: glas met een zwarte kleur en een vettige glans. Soms met fenokristen, watergehalte : 4 – 10% puimsteen: vulkanisch glas dat zeer rijk is aan poriën, ontstaan door stolling van een zeer gasrijke lava. Vaak een witte of grijze kleur. Soms met fenokristen.



## 6.4. Sedimentaire gesteenten

### 6.4.1. Inleiding

Sediment betekent letterlijk 'bezinksel'. Lange tijd is gezegd dat sedimentaire gesteenten ontstaan door bezinking van mineraal- of gesteentefragmenten. Heel veel sedimentaire gesteenten ontstaan ook doordat fragmenten bezinken, lagen vormen en eventueel in de loop der tijden gecementeerd worden. Maar er zijn ook veel sedimentaire gesteenten die hun ontstaan niet te danken hebben aan bezinkingsmechanismen. Denk bijvoorbeeld maar aan steenzout, een sedimentair gesteente dat ontstaat door de precipitatie, neerslag, van haliet uit verdampend zeewater. Of denk aan het gesteente steenkool dat ontstaat door compactie van plantenresten. De definitie dat een sedimentair gesteente ontstaat door bezinking van fragmenten is dus niet voldoende. Een betere, alles dekkende, definitie is: sedimentaire gesteenten zijn dié gesteenten die op of vlak onder het aardoppervlak ontstaan, bij de daarbij behorende druk en temperatuur (tot  $\pm 200$  °C).

De groep van de sedimentaire gesteenten is een zeer grote groep waarbinnen zeer veel ontstaanswijzen mogelijk zijn. Er zijn diverse indelingen van de sedimentaire gesteenten in omloop, en aan deze indelingen wordt nog steeds volop gesleuteld. In de meeste indelingen worden twee hoofdgroepen van elkaar onderscheiden, de klastische sedimentaire gesteenten en de niet-klastische sedimentaire gesteenten. Deze twee groepen worden op hun beurt weer in subgroepen verdeeld, de belangrijkste subgroepen zijn:

<b>KLASTISCHE SEDIMENTEN</b> of allochtone sedimenten	<ul style="list-style-type: none"><li>• terrigene, of siliciklastische, sedimenten</li><li>• pyroklastische sedimenten</li></ul>
<b>NIET-KLASTISCHE SEDIMENTEN</b> of autochtone sedimenten	<ul style="list-style-type: none"><li>• organogene, of biogene, sedimenten</li><li>• residuaire sedimenten</li><li>• chemische sedimenten</li></ul>

De hoofdindeling is in klastische of niet-klastische sedimentaire gesteenten. Het woord klastisch is afgeleid van het Griekse woord 'klaein' hetgeen 'breken' betekent. Klastische gesteenten zijn met andere woorden opgebouwd uit 'gebroken' materiaal, of te wel uit fragmenten. Klastische sedimenten, of allochtone sedimenten, bestaan uit fragmenten die van elders gekomen zijn, de fragmenten hebben afzonderlijk transport ondergaan. Niet-klastische sedimenten, of autochtone sedimenten, zijn ter plekke ontstaan, zij kunnen ook uit fragmenten bestaan maar deze fragmenten hebben geen, of bijna geen, transport ondergaan

### 6.4.2. Klastische sedimenten: pyroklastische sedimenten

Pyros betekent 'vuur', klastisch is afgeleid van het Griekse woord voor breken. Letterlijk zijn dit dus sedimenten die zijn opgebouwd uit door vuur gebroken fragmenten. In de praktijk moeten we dit niet zo letterlijk nemen. Pyroklastische sedimenten bestaan uit fragmenten die door vulkanische activiteit naar het aardoppervlak zijn gebracht. Deze fragmenten zijn met andere woorden door een vulkaan uitgespuwd en door de lucht getransporteerd, vandaar dat deze sedimenten als klastische sedimenten kunnen worden beschouwd.

Fragmenten die door een vulkaan naar buiten zijn gestoten en door de lucht zijn getransporteerd. Wat voor fragmenten zijn dit? Als een vulkaan uitbarst kunnen grote hoeveelheden lava uitstromen. Bij zeer hevige erupties kan de lava echter ook als klodders naar buiten gestoten worden. De klodders schieten de lucht in, koelen af, stollen, vallen neer en vormen een pyroklastische afzetting die uit een pyroklastisch gesteente bestaat. Dit type pyroklastisch sediment bestaat dus uit fragmenten die uit vulkanisch gesteente bestaan. Dit is echter niet altijd het geval. De gassen, dampen en lava die zich door de aardkorst een baan naar het aardoppervlak breken kunnen onderweg overal fragmenten aardkorst oppikken die vervolgens mee naar boven genomen worden. Deze fragmenten, die een zeer variabele samenstelling kunnen hebben, kunnen door een vulkaan uitgestoten worden, door de lucht getransporteerd worden en terechtkomen in de pyroklastische afzetting. Het is zelfs zo dat tijdens vulkaanuitbarstingen alleen verbrijzeld nevgesteente uitgestoten kan worden. Het pyroklastische sediment bestaat in dit geval geheel uit fragmenten gesteente die niet ontstaan zijn door de stolling van lava.

Het is een groep sedimenten die zeer variabel is. Een classificatie van deze groep geschiedt dan ook niet naar de samenstelling maar naar de grootte van de fragmenten:

GROOTTE PYROKLAST	NAAM PYROKLAST	PYROKLASTISCHE AFZETTING	
		los: TEFRA	gecementeerd: PYROKLASTISCH GESTEENTE
↑ 64 mm.	blokken, bommen, slakken	agglomeraat (ronde fragmenten); slak-, bom- of bloktefra	agglomeraat (ronde fragmenten); pyroklastische breccie (hoekige fragmenten)
↑ 2 mm.	lapilli	lapilli tefra	lapilli tuf of 'lapilli stone'
↑ 62.5 µm.	grove as	grove as	grove (as) tuf
↓	fijne as	fijne as	fijne (as) tuf

- Blokken : Deze pyroklasten hebben een hoekige vorm, ze zijn in vaste toestand uitgeworpen
- Bommen : Deze pyroklasten zijn in vloeibare toestand uitgeworpen; de klodders lava zijn in de lucht gestold en vaak ook gestroomlijnd.
- Slakken : Deze pyroklasten zijn ook in vloeibare toestand uitgeworpen. Door hevige ontgassing tijdens de stolling zijn zeer onregelmatige vormen ontstaan.

#### 6.4.3. Klastische sedimenten: terrigene, of siliciklastische, gesteenten

Klastische sedimenten zijn opgebouwd uit fragmenten die transport ondergaan hebben. Terri is afgeleid van het Latijnse woord 'terra' hetgeen 'aarde' betekent, 'geen' is afgeleid van het Griekse woord voor ontstaan, 'genos'. Letterlijk zijn terrigene sedimenten die sedimenten die zijn opgebouwd uit gebroken materiaal, fragmenten, die afkomstig zijn van de aarde. In de praktijk betekent dit dat de herkomst van de fragmenten zeer variabel kan zijn maar dat zij niet door een vulkaan zijn uitgespuwd, want dan is sprake van een pyroklastisch gesteente. De fragmenten in een terrigeen sediment zijn ontstaan als gevolg van mechanische of chemische verwerking van het moedergesteente. De grootte van deze fragmenten kan zeer variabel zijn. De fragmenten kunnen vervolgens getransporteerd worden door bijvoorbeeld water, wind of ijs óf kunnen door hun eigen gewicht de helling afrollen en zo getransporteerd worden. Wind kan alleen lichte fragmenten meenemen. Water en ijs daarentegen kunnen behoorlijk grote brokken meenemen. Aangezien er bij al deze afzettingen sprake is van fragmenten geschiedt een eerste onderverdeling naar de korrelgrootte:

GROOTTE KLAST	KLASTISCHE GESTEENTE		
	Los	gecementeerd:	Grieks/Latijn
↑ 2 mm.	grind	conglomeraat (ronde fragmenten); breccie (hoekige fragmenten)	psephiet/rudiet
↑ 62.5 µm.	zand	zandsteen	psammiet/areniet
↑ 4 µm.	silt	siltsteen	./aleuroliet
↓	klei	kleisteen schalie (gelaagd)	peliet/lutiet

Dit is een belangrijk diagram. Vaak wordt over het hoofd gezien dat de eerste indeling alleen gebaseerd is op de korrelgrootte. Wel is het zo dat deze indeling iets minder mooi is dan het lijkt. Een gesteente is bv zelden alléén opgebouwd uit fragmenten die groter zijn dan 2 mm. Als deze grotere fragmenten afgezet worden, worden kleinere fragmenten 'gevangen' tussen de grotere fragmenten, dit wordt de matrix genoemd. En aanwezige poriën kunnen later gevuld worden met cement dat een variabele samenstelling en

korrelgrootte kan hebben. Het uiteindelijke gesteente is opgebouwd uit gecementeerde fragmenten met een variabele korrelgrootte. Dit gesteente wordt een conglomeraat genoemd als meer dan 50% van het gesteente uit fragmenten bestaat, en minstens 50% hiervan, dus 25% van het totaal, uit afgeronde fragmenten bestaat die groter zijn dan 2 mm. Het gesteente wordt een zandsteen genoemd als meer dan 50% van het gesteente uit fragmenten bestaat en 25% tot 75% van deze fragmenten een grootte heeft tussen 62.5 µm en 2 mm. De mineralogie van de fragmenten speelt hierbij dus geen rol. Dus, een gesteente dat voor 80 % is opgebouwd uit gecementeerde korrels die een diameter hebben van 1 mm. wordt een zandsteen genoemd, of de korrels nu uit kwarts, calciet, olivijn of welk mineraal dan ook bestaan.

Klei, kleisteen en schalie:

De allerkleinste fractie. Let op: alle deeltjes kleiner dan 4µm behoren tot de kleifractie, dit kunnen dus ook hele kleine deeltjes kwarts of calciet zijn. Het zijn niet per definitie kleimineralen hoewel dat natuurlijk wel vaak het geval is. Afzettingen van klei worden gevonden op plekken waar de kracht van het transporterende medium minimaal is geworden: in diepzeëën, meren, binnenbochten van rivieren et cetera.

Siltsteen

De löss in Zuid-Limburg is een voorbeeld van een siltafzetting in Nederland. Afgezet in het Pleistoceen. Gedurende deze koude periode was er geen vegetatie om losliggende deeltjes vast te houden. De wind had vrij spel en nam kleine deeltjes klei, kwarts en andere mineralen op om ze mee te voeren en weer af te zetten om löss te vormen.

Conglomeraat en breccie

Grotere fragmenten kunnen zowel door water als door ijs getransporteerd worden. Ook langs berghellingen zijn puinwaaiers te vinden die bestaan uit grotere fragmenten die als gevolg van hun eigen gewicht de berghelling afgerold zijn. Niet gecementeerd wordt het grind genoemd, gecementeerd conglomeraat of breccie (uitspraak: breksie). In een conglomeraat zijn de fragmenten afgerond, in een breccie zijn zij hoekig.

### Zandsteen

Dit is de belangrijkste groep. Zandstenen kunnen qua samenstelling zeer variabel zijn. Welke mineralen in een zandsteen aanwezig zijn is afhankelijk van zeer veel factoren. In de eerste plaats moeten ergens door verwerking fragmenten ontstaan zijn, de samenstelling van deze fragmenten is afhankelijk van het aanwezige moedersgesteente. Vervolgens worden deze fragmenten getransporteerd, vaak door water. Tijdens dit transport treedt nog steeds verwerking op. Als gevolg van chemische verwerking kunnen mineralen overgaan in andere mineralen of verdwijnen door oplossing. Calciet is een mineraal dat in een zuur milieu oplost. Veldspaten zetten gemakkelijk om in kleimineralen. Veel mafische mineralen zetten op den duur ook om in kleimineralen. Door mechanische verwerking schilferen de fragmenten af en worden kleiner en kleiner. Oorspronkelijke gesteentefragmenten kunnen zó langzamerhand overgaan in monominerale korrels. Hoe langer het transport duurt des te kleiner en ronder worden de fragmenten, des te meer mineralen zijn omgezet in kleimineralen, des te minder mineralen zijn over die gemakkelijk 'vergruizen'. Niet-silicaten verwerken het snelst. Silicaten zijn iets resistenter tegen verwerking. Kwarts is een mineraal dat hard is, geen splijting heeft en niet oplost. Tijdens het transport schilfert het af maar verdwijnt niet. Hoe langer het transport duurt des te groter het aandeel kwarts in de overblijvende fragmenten. Vandaar dat terrigene sedimenten ook wel sili-ciklastische sedimenten genoemd worden: in de gesteenten zijn vooral kwarts en andere silicaten aanwezig. Aan de grootte, de afrondingsgraad en de samenstelling van de fragmenten kan afgeleid worden of de fragmenten lang onderweg zijn geweest of niet. Samenvattend:

relatief kort transport: slechte sortering (veel variatie in de korrelgrootte)  
veel hoekige korrels  
veel variatie in de samenstelling van de korrels

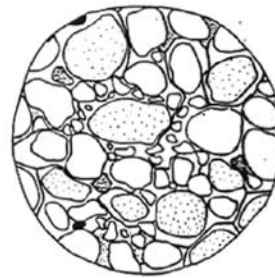
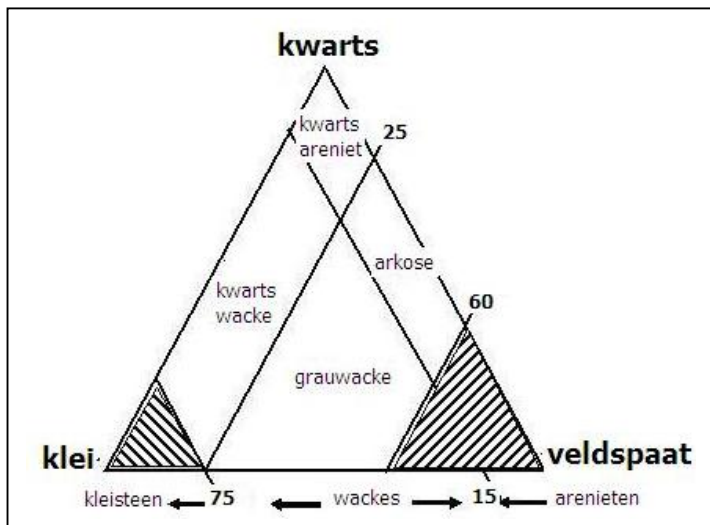
relatief lang transport: goede sortering (korrels dezelfde grootte)  
veel afgeronde korrels  
veel kwarts  
(veel verweringsmateriaal: wordt elders afgezet)

Als zandkorrels worden afgezet is sprake van zand, een los sediment. Dit niet-gecementeerd gesteente kan in de loop van de tijd overgaan in een hard vast gesteente. De zandkorrels kunnen cementeren doordat mineralen als calciet, kwarts, klei of hematiet tussen de korrels precipiteren. Dit proces treedt op ná de afzetting van de korrels. In sedimentaire gesteenten (dus niet alleen bij zandstenen) worden processen die ná de

afzetting in het sediment plaatsvinden, bij normale temperatuur en druk, samengevat onder de naam 'diagenese' of 'diagenetische processen'. Hier hoort cementatie bij maar ook compactie, oplossingsverschijnselen, rekristallisatieprocessen et cetera.

Voor de classificatie van zandsteen zijn diverse systemen in omloop. Tijdens het practicum maken we gebruik van een simpel diagram (zie figuur 36). Dit classificatiediagram kijkt naar de hoeveelheid aanwezige korrels ten opzichte van de fijnere matrix (klei, silt), en vervolgens naar de mineraalinhoud. Qua mineraalinhoud wordt onderscheid gemaakt tussen kwarts en veldspaten. Dit is natuurlijk niet reëel, er kunnen veel andere mineralen in een zandsteen aanwezig zijn. Vaak zijn ook korrels aanwezig die uit meerdere mineralen zijn opgebouwd, het zijn in feite kleine gesteentefragmentjes. Voor het gemak rekenen we alles wat met kwarts te maken heeft (kwarts, chalcedoon, vuursteen, opaal, kwartsiet) tot 'kwarts'. En alle andere mineralen of gesteentefragmentjes tot 'veldspaat': het diagram is dan eenvoudig en doeltreffend in het gebruik:

>75 % klei:	kleisteen of schalie (dit is dus geen zandstenen)	
15 – 75 % klei:	wackes	zandsteen
< 15% klei:	arenieten	



Figuur 36: classificatiediagram voor zandsteen

#### 6.4.4. Niet-klastische sedimenten: organogene gesteenten

Organogene sedimentaire afzettingen en gesteenten zijn die afzettingen en gesteenten die zijn opgebouwd uit organismen of restanten hiervan. Vandaar dat het ook wel biogene gesteenten genoemd worden. Twee belangrijke groepen gesteenten behoren tot de organogene sedimenten: kaustobiolieten en kalkstenen.

##### Kaustobiolieten

Kaustos betekent verbranden, bios = leven, lithos = steen. Kaustobiolieten zijn letterlijk gesteenten die opgebouwd zijn uit, oorspronkelijk, levend materiaal en die verbrand kunnen worden. Tot deze groep gesteenten behoren turf, bruinkool, steenkool en antraciet.

Kaustobiolieten bestaan uit gecompacteerd resten van planten, bomen en zwammen. Onder normale omstandigheden rotten deze plantaardige organismen na het afsterven gewoon weg. Als de restanten echter in een zuurstofloos milieu terecht komen, bijvoorbeeld in moerassen of veengebieden, kunnen zij bewaard blijven. Door de afzetting van nieuwe lagen sediment op de lagen met plantenresten kunnen deze laatste

steeds dieper komen te liggen. Door geringe toename van de druk en de temperatuur ondergaan de plant-aardige restanten (diagenetische) veranderingen. Er treedt compactie op, water, dampen en gassen worden uitgeperst en de structuur van de organische verbindingen verandert. Het gevolg hiervan is dat de resterende massa steeds koolstofrijker (C-rijker) wordt. Deze processen worden dan ook samengevat onder de naam 'inkoling'. De gesteenten die tijdens dit proces ontstaan worden ingedeeld naar hun koolstofgehalte:

turf	< 60% C	Amerikaanse naamgeving: peat
bruinkool	60 – 77 % C	lignite, sub bituminous coal
steenkool	77 – 91 % C	
vlamkool	77 – 80 % C	high volatile bituminous coal
gaskool	80 – 85 % C	
vetkool	85 – 87 % C	
es- en magerkool	87 – 91 % C	low volatile bituminous coal
antraciet	91 – 97 % C	anthracite

Hoe hoger het C-gehalte, des te meer energie komt vrij bij verbranding van het gesteente, des te relevanter het gesteente als brandstof. Indien de inkoling na het antracietstadium nog verder gaat ontstaat respectievelijk meta-antraciet en vervolgens grafiet. Deze producten gedragen zich inert en zijn dus als brandstof niet meer relevant.

Vaak is in deze kaustobiolieten het oorspronkelijke organische materiaal nog herkenbaar. Dit materiaal wordt in drie groepen onderverdeeld. Dit worden maceraalgroepen genoemd, de componenten hiervan 'maceralen'.

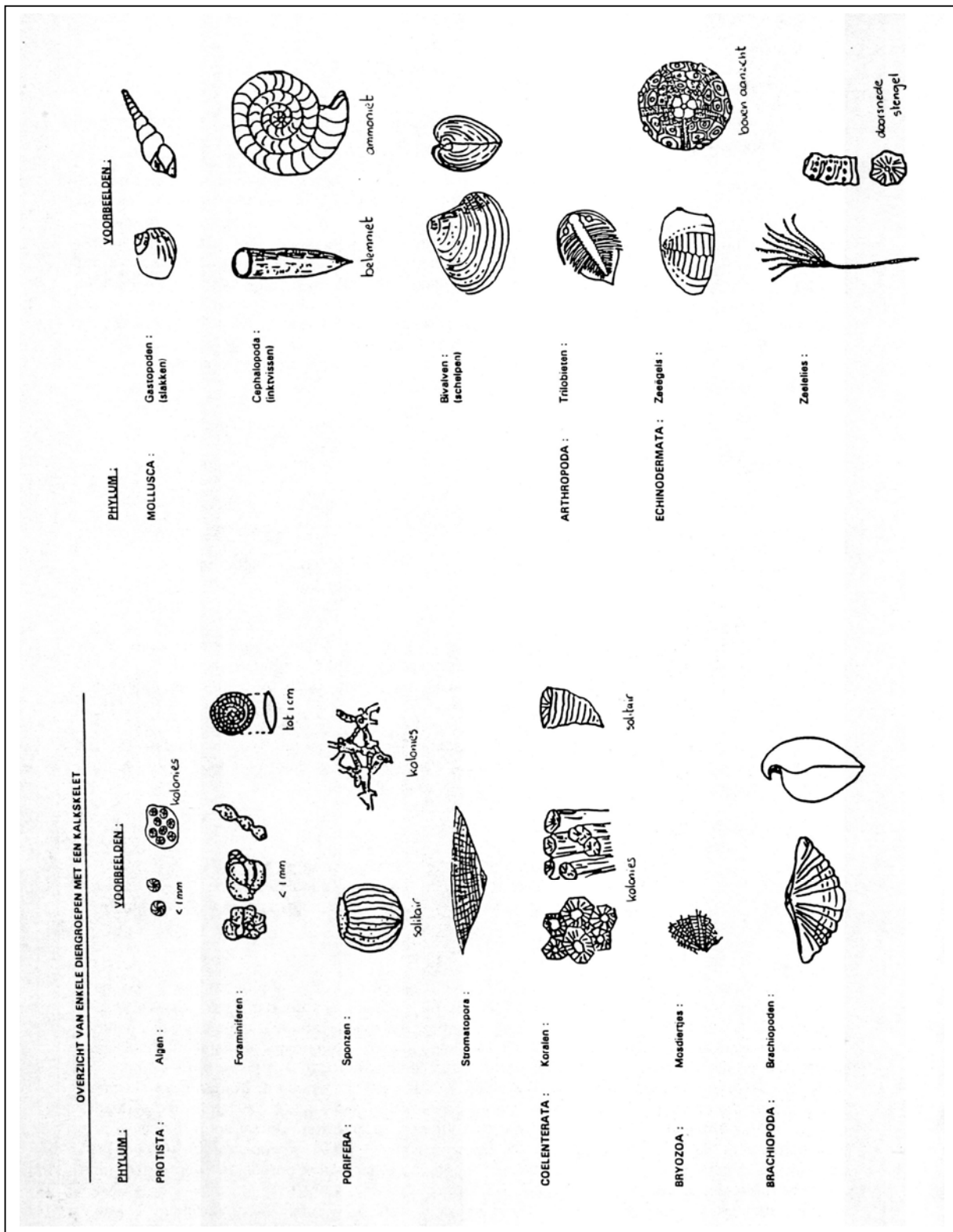
Maceraalgroep:	Maceraal:	
Vitriniet	teliniet, colliniet, ea.:	celstructuur en celinhoud
Exiniet	sporiniet, cutiniet, ea.:	sporen, cuticula's van bladeren
Inertiniet	fusiniet, sklerotiniet, ea.:	verkoold hout, sporen van zwammen

## Kalksteen

Kalkstenen zijn opgebouwd uit 'kalk'. In chemische zin betekent dit dat deze gesteenten zijn opgebouwd uit mineralen uit de carbonaatgroep, dus uit mineralen met een  $\text{CO}_3^{2-}$ -anion in de chemische verbinding. Deze kalk is afkomstig van organismen. Vooral in zeewater, maar ook in zoet water, leven veel organismen met een inwendig of uitwendig kalkskelet. Voorbeelden van dergelijke organismen zijn algen, foraminifera, sponzen, stromatopora, koralen, mosdiertjes, brachiopoda, slakken, inktvissen, schelpen, trilobieten zee-egels, zeelelies, en anderen. (zie figuur 37). Hun skeletten bestaan doorgaans uit calciet, aragoniet, of uit allebei. Calciet en aragoniet hebben beiden de samenstelling  $\text{CaCO}_3$  (door een verschil in kristallijne opbouw hebben deze chemisch identieke verbindingen aparte namen gekregen, het zijn polymorfen van elkaar). Als de organismen doodgaan rotten de weke delen meestal weg, de skeletten blijven achter. Deze kunnen bezinken en op de bodem van zee of meer lagen vormen. De skeletten kunnen heel blijven, maar vaker gaan zij kapot of gaan geheel over in gruis. De organismen kunnen ook in hun geheel door andere organismen opgegeten worden, de skeletten kunnen dan als zeer fijnkorrelige kalk weer uitgescheiden worden.

Accumulaties van de skeletten, of de restanten daarvan, kunnen kalkafzettingen vormen op de bodem van meer of zee. Oorspronkelijk zijn dit lagen die uit los materiaal bestaan. Tussen de losse deeltjes zijn poriën aanwezig die gevuld zijn met water. Door bedekking met nieuwe lagen sediment kunnen deze losse kalkafzettingen diagenetische veranderingen ondergaan. De lagen worden gecompacteerd, water wordt uitgeperst, er kan oplossing en rekristallisatie van de aanwezige calciet en aragoniet optreden. Uit het aanwezige poriënwater kan calciet precipiteren. Deze calciet vormt kristallen in de poriën en vormt huidjes rond de aanwezige deeltjes waardoor zij gecementeerd worden. Er ontstaat een stevig gesteente, een kalksteen. De skeletten en de restanten van de skeletten die in deze kalkstenen aanwezig kunnen zijn worden fossielen genoemd.

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat kalkstenen zelden uit deeltjes bestaan die allen dezelfde grootte hebben. Het kan gebeuren dat op een bepaalde plaats de skeletten van slechts één organisme accumuleren waardoor een zeer homogene korrelgrootte in de uiteindelijke kalksteen aanwezig is. Meestal echter is de grootte van de aanwezige deeltjes zeer variabel.



Figuur 37: Voorbeelden van organismen met een kalkskelet

Toch berust een veel gebruikte onderverdeling van de kalkstenen op de aanwezige korrelgrootteverdeling. Dit is de classificatie van Dunham (1962). Dunham onderscheidt twee korrelgroottes: 'mud', < 0.03 mm. en 'grains', > 0.03 mm. Daarnaast onderscheidt Dunham twee speciale kalkstenen:

> 50% mud: (mud-supported)	< 10% grains	mudstone
	> 10% grains	wackestone

> 50% grains: (grain supported)	> 5% mud	packstone
	< 5% mud	grainstone

boundstone: de samenstellende delen zijn al tijdens het leven van de organismen bijeen gebracht  
 crystalline limestone: de aanwezige mineralen zijn gerekristalliseerd waardoor de primaire structuur van het gesteente verloren is gegaan.

De skeletten van de organismen bestaan vaak uit calciet, aragoniet of uit beide mineralen. In recent gevormde lagen op de zeebodem komen beide mineralen voor. In oudere kalkstenen is de aragoniet echter verdwenen. Aragoniet is eigenlijk niet stabiel op het aardoppervlak, het lost op óf gaat over in calciet. Naast calciet kan echter ook het mineraal dolomiet,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , aanwezig zijn in kalkstenen. Dolomiet kan ontstaan als een magnesiumrijke vloeistof door een kalksteen stroomt. Hierdoor kan aragoniet of calciet rekristalliseren in dolomiet. Dit diagenetische proces wordt 'dolomitatie' genoemd:  $2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Zelden wordt alle calciet omgezet in dolomiet, de volgende indeling is van toepassing:

0 - 10% dolomiet:	kalksteen
10 - 50% dolomiet:	dolomietische kalksteen
50 - 90% dolomiet:	calcietische dolomiet
> 90% dolomiet:	dolomiet ('dolostone')

Doordat één dolomietkristal minder ruimte inneemt dan twee calcietkristallen hebben dolomietgesteenten vaak een hoge porositeit: het zijn belangrijke (potentiële) reservoirgesteenten. Indien gebruik gemaakt wordt van de classificatie van Dunham wordt het gesteente dolomiet tot de kristallijne kalkstenen gerekend.

#### Klastische kalksteen

Organismen met een kalkskelet leven in zeeën en meren. De organismen gaan dood en zinken naar de bodem. De skeletten of skeletfragmenten worden in de meeste gevallen slechts over een zeer kleine afstand getransporteerd, er is sprake van een autochtoon sediment. Carbonaatmineralen overleven transport vaak ook niet lang. De mineralen zijn zacht (hardheid 3) en splijten gemakkelijk. Zodra korrels calciet tegen elkaar of tegen andere mineraalkorrels botsen, breken ze langs de splijtvlakken en worden snel kleiner en kleiner. Daarnaast lossen carbonaten als calciet en aragoniet gemakkelijk op zodra ze in een zuur milieu terecht komen. Fragmenten die uit carbonaatmineralen bestaan zullen dus tijdens transport snel verdwijnen of overgaan in zeer kleine deeltjes die lang getransporteerd kunnen worden of mogelijkwerwijs door oplossing verdwijnen. Toch bestaan klastische kalkstenen. Als duidelijk is dat een kalksteen is opgebouwd uit fragmenten die transport ondergaan hebben mag het gesteente ook als een klastisch gesteente geclassificeerd worden, bv. een kalkzandsteen (of kalkareniet), een kalkbreccie of kalkconglomeraat (calcirudiet).

Het gesteente dat in Zuid-Limburg 'mergel' genoemd wordt is een voorbeeld van een zuivere kalksteen die grotendeels uit kleine afgeronde korrels calciet is samengesteld, en is in feite een kalkzandsteen.

Het gesteente dat door geologen 'mergel' genoemd wordt is eveneens een klastisch gesteente en bestaat uit een mengsel van klei en zeer kleine kalkdeeltjes, de onderverdeling luidt als volgt:

10 - 25% kalk, rest klei:	mergelige klei
25 - 75% kalk, rest klei:	mergel
75 - 90% kalk, rest klei:	mergelige kalksteen
> 90% kalk, rest klei:	kalksteen

#### 6.4.5. Niet-klastische sedimenten: residuaire gesteenten

Residuaire sedimentaire gesteenten zijn die gesteenten die als residu achter blijven na intensieve chemische verwerking. In warme, subtropische tot tropische gebieden met veel regen zijn weinig mineralen resistent tegen verwerking. Mineralen als alkaliveldspaten en plagioklaas zetten vrij snel om in kleimineralen. Maar ook mineralen als pyroxenen, amfibolen en glimmers zetten op den duur om in kleimineralen. Bij verdergaande verwerking kunnen deze kleimineralen weer omzetten in diverse aluminiumhydroxiden met de samenstelling

Al(OH)<sub>3</sub>. Tijdens deze omzettingen ontstaan diverse elementen die in oplossing blijven en zo worden afgevoerd. Indien tijdens de omzetting ijzer, Fe, vrijkomt dan bindt deze zich onmiddellijk aan zuurstof en ontstaat goethiet, FeO(OH), of hematiet, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Deze ijzerverbindingen zijn immobiel, zij blijven met andere woorden achter in het residu. Afhankelijk van het oorspronkelijke gesteenten en de processen die optreden kunnen verschillende residuaire gesteenten ontstaan. De belangrijkste zijn :

- Kaolien: Dit gesteenten bestaat vnl. uit kaoliniet, een kleimineraal, soms is kwarts aanwezig.
- Lateriet: Dit gesteente bestaat uit kaoliniet en goethiet of hematiet, soms is kwarts aanwezig.
- Bauxiet : Dit gesteenten bestaat uit Al-hydroxiden (o.a. gibbsiet, boehmiet, diaspoor). Het gesteente kan eveneens goethiet of hematiet bevatten en kwarts.

#### 6.4.6. Niet-klastische sedimenten: chemische gesteenten

Tot deze groep van sedimentaire gesteenten behoren die gesteenten die zijn opgebouwd uit mineralen die zijn ontstaan door precipitatie, neerslag, uit waterige oplossingen. Dit kan zowel door precipitatie uit zout water zijn als door precipitatie uit zoet water. De bekendste chemische gesteenten zijn de gesteenten die ontstaan door verdamping van zout water: evaporieten.

##### Evaporieten

Evaporietafzettingen ontstaan door evaporatie, verdamping, van zout water, meestal is dit zeewater. Als gevolg van deze verdamping wordt de concentratie van de opgeloste stoffen in het overblijvende water steeds hoger. De concentratie kan zo hoog worden dat mineralen gaan neerslaan. Normaal zeewater bevat 3.45 gew% aan opgeloste stoffen: de saliniteit is 34.5. De volgende ionen zijn aanwezig (samen 99.9%):

Na <sup>+</sup> :	30.61%	K <sup>+</sup> :	1.10%	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> :	7.68%
Mg <sup>2+</sup> :	3.69%	Sr <sup>2+</sup> :	0.03%	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :	0.41
Ca <sup>2+</sup> :	1.16%	Cl <sup>-</sup> :	55.04%	Br <sup>-</sup> :	0.19%

Deze ionen zijn aangevoerd door de rivieren. In normaal rivierwater is zelden meer dan 0.01% aan opgeloste ionen aanwezig. Door verdamping van zeewater neemt de saliniteit toe. Voor bepaalde verbindingen zal het oplosbaarheidproduct overschreden worden en deze zullen gaan neerslaan. Stel dat uitgegaan wordt van een kolom zeewater van 100 cm. hoogte en deze kolom water verdampt geheel dan zullen bij toenemende saliniteit achtereenvolgens neerslaan:

Toename Saliniteit	↓	carbonaten (aragoniet en calciet)	0.04 mm
		gips	0.65 mm
		haliet	12.50 mm
		K-, Mg-zouten (sylviet, carnalliet, bischofiet)	2.50 mm
		-----	Totaal 15.69 mm

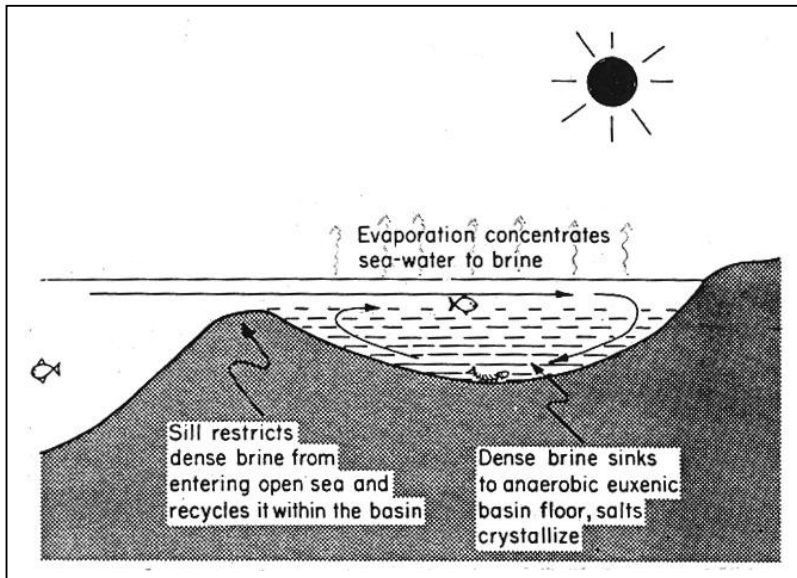
Deze opeenvolging wordt ook in natuurlijke zoutafzettingen terug gevonden. Hierin blijkt echter dat ook het mineraal dolomiet een belangrijk mineraal kan zijn, ontstaan door dolomitisatie van de afgezette carbonaten. Door verdamping van het zeewater slaat calciet neer. Ca verdwijnt terwijl Mg in het zeewater achterblijft. Dit relatief Mg-rijke zeewater kan dolomitisatie van de carbonaten veroorzaken.

In natuurlijke evaporietafzettingen is naast of in plaats van gips ook vaak het mineraal anhydriet aanwezig. Deze anhydriet ontstaat door 'ontwatering' van de gips: CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O → CaSO<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O.

In natuurlijke evaporietafzettingen doet zich een ander apart verschijnsel voor. Veel afzettingen bestaan uit een herhaling van bovenstaande opeenvolging. Men denkt dat deze cyclische zoutafzettingen ontstaan zijn in lagunes die delen van het jaar afgesloten waren van de open zee (zie figuur 38). Gedurende de tijd dat de lagune in verbinding stond met de zee stroomde hij vol. Gedurende de tijd dat de lagune afgesloten was van de zee vond verdamping van het water plaats en ontstonden de zoutafzettingen. Een (jaarlijkse) herhaling van dit proces levert cyclische afzettingen. Klimatologische factoren zijn bij dit proces van belang: een subtropisch tot tropisch klimaat is nodig en jaarlijks terugkerende verandering in het zeewaterniveau door b.v. passaatwinden.

Evaporietafzettingen kunnen ook ontstaan door indamping van zoutmeren of door verdamping van zeewater dat vlakke kustgebieden met een woestijnklimaat heeft overstroemd (sabkha's).

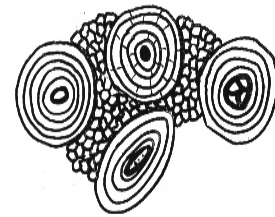




*Figuur 38: een lagune waarin een deel van het jaar verdamping plaatsvindt en evaporieten neerslaan*

#### Oölieten

In open zeeën kunnen onder speciale omstandigheden mineralen precipiteren rond kleine fragmenten die in suspensie in het water aanwezig zijn. Dit kunnen bv. zandkorreltjes of kleine skeletjes zijn. Om kleine fragmenten in suspensie te houden is een hoog-energetisch milieu nodig. Daarnaast is aanvoer van water met een oververzadiging aan bepaalde elementen noodzakelijk. De in oplossing aanwezige elementen slaan als mineraal neer op de in suspensie aanwezige fragmenten en vormen dunne laagjes rond deze fragmenten. Door de vorming van steeds meer laagjes ontstaan concentrisch opgebouwde bolletjes, dit worden oöieden genoemd naar het Griekse woord voor ei, oön. Vaak zijn deze oöieden slechts 1 tot 2 mm. in diameter. Indien deze oöieden cementeren ontstaat een stevig gesteente dat een oöliet genoemd wordt. Afhankelijk van de samenstelling van de oöieden en/of het cement kan sprake zijn van een kalkoöliet, een kwartsoöliet of een ijzeroöliet.



#### Travertijn

Travertijn is de naam van een kalksteen die ontstaat door precipitatie van kalk, doorgaans aragoniet, uit water dat via bronnen het aardoppervlak bereikt. De aragoniet vormt laagsgewijze overkorstingen rond de bron. Hierbij kunnen blaadjes, mosjes, takjes, insecten, e.d. door de kalk omsloten worden.

#### 'Druipsteen'

Deze kalksteenafzettingen zijn vooral bekend uit grotten. Grondwater dat door de opname van humuszuren zuur is geworden kan door kalksteenafzettingen sijpelen en onderweg kalk oplossen. Zodra dit water in open ruimten uitkomt die in verbinding staan met de atmosfeer kan de kalk weer neerslaan. Hierbij kunnen o.a. stalagmieten en stalactieten ontstaan.

#### 6.4.7. Korte beschrijving van de belangrijkste sedimentaire gesteenten

- |           |  |
|-----------|--|
| Antraciet | Antraciet behoort tot de groep van de kaustobiolieten. Het gesteente heeft een zeer hoge inkolingsgraad, is bros, heeft een diepzwarte kleur en een duidelijke glans           |
| Bauxiet   | Residuaire gesteente. Aluminiumhydroxiden als gibbsiet, diaspoor en boehmiet zijn de belangrijkste mineralen. Indien het gesteente alleen uit deze mineralen bestaat heeft het |

een witte kleur. Vaak zijn echter ijzerhydroxiden of ijzeroxiden aanwezig waardoor het gesteente een rode of roodbruine kleur krijgt, het lijkt dan erg op lateriet.

Breccie	Uitspraak: 'breksie'. Een breccie is een klastisch gesteente. Een groot deel van de aanwezige fragmenten is groter dan 2 mm. De fragmenten zijn hoekig. Breccies kunnen ook door andere processen ontstaan. Ook bewegingen langs breuken kunnen leiden tot de vorming van breccies. .
Bruinkool	Bruinkool behoort tot de groep van de kaustobiolieten. Het gesteente heeft een lage inkolingsgraad, heeft een losse structuur met herkenbare plantenresten, heeft een bruine tot bruinzwarte kleur en een doffe glans
Conglomeraat	Een conglomeraat is een klastisch gesteente. Een groot deel van de aanwezige fragmenten is groter dan 2 mm. De fragmenten zijn afgerond.
Dolomiet	Een dolomiet is een kalksteen waarin 90 tot 100% van de calciet is omgezet in het mineraal dolomiet. In een calcietische dolomiet is 50 tot 90% van de calciet omgezet. Dolomiet is lastig van kalksteen te onderscheiden; enkele tips: <ul style="list-style-type: none"><li>• De kleine dolomietkristallen zijn vaak euhedrisch en hebben vaak 'gebogen' vlakjes.</li><li>• Dolomietkristallen zijn compacter dan calcietkristallen; tijdens de dolomitatie heeft dit de vorming van poriën tot gevolg, deze zijn vaak te zien.</li><li>• Dolomiet reageert niet met verdund zoutzuur, calciet wél. Maar let op: het gesteente dolomiet kan ook calciet bevatten.</li></ul>
Kalksteen	Een grote groep gesteenten met diverse ontstaansmogelijkheden. De meeste kalkstenen hebben een organogene, biogene, oorsprong en zijn opgebouwd uit skeletten, of restanten daarvan, van organismen met een kalkskelet. Classificatie van Dunham: blz. 99. Kalkstenen kunnen in bepaalde gevallen ook ontstaan door precipitatie van aragoniet of calciet in laagjes rond kleine deeltjes die in suspensie in zeewater aanwezig zijn. Dit worden oöiden genoemd, het gesteente wordt een kalkoöiet genoemd. Kalksteen die ontstaat door precipitatie van aragoniet rond bronnen wordt 'travertijn' genoemd.
Kleisteel	Klastisch gesteente. De korrelgrootte van de deeltjes is minder dan 4µm.
Lateriet	Residuaire gesteente dat uit witte kaoliniet en ijzermineralen is opgebouwd. Het uiterlijk van het gesteente wordt bepaald door de verdeling van de ijzermineralen en door het type ijzermineraal. Is goethiet aanwezig dan heeft het gesteente vaak een okergele kleur. Is hematiet aanwezig dan kan de lateriet een baksteenrode kleur krijgen. Soms bevinden de ijzermineralen zich in boonvormige concreties ('boonerts').
Schalie	Klastisch gesteente. De korrelgrootte van de deeltjes is minder dan 4µm. Een schalie heeft een duidelijke gelaagdheid.
Steenkool	Kaustobioliet met bepaalde inkolingsgraad. Het gesteente is vrij bros, heeft een diepzwarte kleur en een duidelijke glans.
Steenzout	Steenzout behoort tot de chemische sedimentaire gesteenten. Het gesteente ontstaat door verdamping van zeewater. Steenzout wordt meestal opgebouwd uit haliet. Zuivere haliet is kleurloos. Door roosterfouten kan haliet, en dus steenzout, diverse kleuren krijgen.
Zand	Klastisch gesteente, ongeconsolideerd, en bestaat uit korreltjes met een diameter tussen 62.5 µm en 2 mm.
Zandsteen	Klastisch gesteente. De diameter van de korrels kan variëren maar bevindt zich tussen de 62.5 µm. en 2 mm. Naar de mineralogie kunnen de zandstenen gespecificeerd worden. Arenieten (kwartsareniet, arkose) bevatten minder dan 15% klei. Wackes (kwartswacke, grauwacke) bevatten tussen de 15 en 75% klei. Zie bladzijde 96. Een zandsteen die geheel uit getransporteerde kalkdeeltjes bestaat wordt vaak een kalkzandsteen of kalkareniet genoemd.

## 6.5. Metamorfe gesteenten

### 6.5.1. Inleiding

Metamorfe gesteenten zijn die gesteenten die een metamorfose ondergaan hebben. Een metamorfose is niets anders dan een gedaanteverandering. Deze gedaanteverandering heeft betrekking op de mineralogie van het gesteente, de textuur van het gesteente of op beide. Metamorfose is een proces dat optreedt omdat de fysische condities, als belangrijkste de druk en de temperatuur, waarbij een gesteente ontstaan is, veranderen. Als de druk, de temperatuur, of beide, gaan veranderen, gaat het gesteente zich aanpassen aan de veranderende situatie. Eerst zullen de veranderingen maar klein zijn. Hoe groter het verschil met de oorspronkelijke vormingscondities wordt, en hoe langer dit verschil aanhoudt, des te ingrijpender zijn de veranderingen.

Een verandering van de temperatuur kan instabiliteit van de mineralen tot gevolg hebben. De mineralen gaan rekristalliseren, er ontstaan nieuwe mineralen die wel in evenwicht zijn met de veranderde temperatuur. De textuur van het gesteente kan hierbij min of meer gelijk blijven, maar veranderingen zijn mogelijk. Een verhoging van de druk heeft vaak vérstrekkende gevolgen voor de textuur, deze kan geheel anders worden. Daar de oorspronkelijke textuur van het gesteente tijdens dit proces gedeformeerd wordt, wordt ook wel gezegd dat er 'deformatie' plaatsvindt. Een deformatiefase kan samengaan met een fase waarin de mineralogie verandert maar dit hoeft niet. Een gesteente kan diverse deformatiefasen ondergaan hebben en diverse fasen met nieuwgroei van mineralen.

Er zijn veel processen denkbaar die de metamorfose kunnen bewerkstelligen. Progressieve bedekking door sedimenten, en een hiermee samenhangende toename van de druk en de temperatuur, kunnen metamorfose veroorzaken. Maar ook de hitte die van een binnendringend magmalichaam uitgaat, of de inslag van een meteoriet, kan bepaalde veranderingen in een gesteente teweeg brengen. Een belangrijk aspect van de metamorfe processen is dat deze plaatsvinden terwijl het gesteente in vaste toestand is. Slechts in uitzonderlijke gevallen kan het gesteente deels of geheel opsmelten. In de meeste gevallen blijft ook de chemische samenstelling van het gesteente gelijk, er is vaak sprake van een isochemisch proces.

Alle gesteenten in de aarde kunnen in principe metamorfose ondergaan, dit kunnen dus zowel magmatische, sedimentaire als metamorfe gesteenten zijn. Tijdens de metamorfose ontstaan de nieuwe, metamorfe, gesteenten. Vaak is dit gesteente zo totaal anders dan het oorspronkelijke gesteente dat niet meer te zien is wat het oorspronkelijke gesteente geweest is; oude texturen verdwijnen vaak geheel. Een enkele keer is aan het nieuwe gesteente nog wel te zien wat het oorspronkelijke gesteente geweest is, een magmatische textuur, of bijvoorbeeld een sedimentaire gelaagdheid, kan tijdens de metamorfose bewaard zijn gebleven.

### 6.5.2. factoren die de metamorfose beïnvloeden

#### Temperatuur

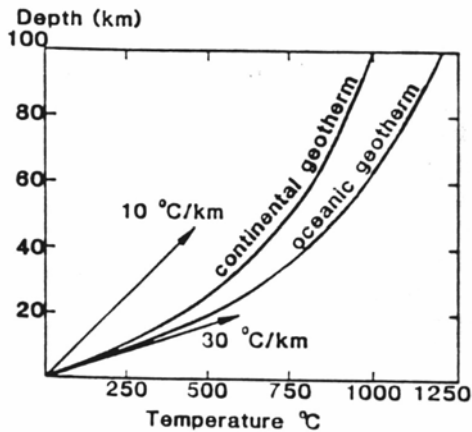
Gesteenten zijn slechte warmtegeleiders, temperatuurveranderingen gaan daardoor niet snel. Diep in de aarde hebben grote volumes gesteenten doorgaans tientallen miljoenen jaren nodig om een substantiële temperatuurverandering te ondergaan.

De temperatuur in de aarde neemt toe met de diepte. De mate waarmee de temperatuur toeneemt wordt aangegeven met de 'geothermische gradiënt'. Deze geothermische gradiënt varieert globaal tussen 15°C en 30°C per kilometer. Variaties in de hoeveelheid warmte ter plekke is het gevolg van variatie in:

- de hoeveelheid warmte die vanuit de aardmantel naar de aardkorst stroomt
- de hoeveelheid warmte die vrijkomt door radioactief verval
- de hoeveelheid warmte die het gevolg is van aanwezige magmalichamen.

Naast een toename van de temperatuur is ook een afname van de temperatuur mogelijk. Door absorptie van grote hoeveelheden koud gesteente (bijvoorbeeld sedimenten van de oceaانبodem) kan de temperatuur omlaag gaan. Ook opheffing van een geheel gebied, en verwijdering van de bovenliggende lagen door verweering en erosie, kan een temperatuurdaling tot gevolg hebben.

Hoe de temperatuur in de diepte verloopt is afhankelijk van de lokale situatie. Een geotherm geeft de precieze relatie weer tussen diepte en temperatuur. In figuur 39 zijn twee geothermen van relatief stabiele gebieden uitgezet.



*Figuur 39: representatieve geothermen voor stabiele continentale en oceanische gebieden.*

### Druk

De druk die op een gesteente wordt uitgeoefend hangt af van het gewicht van de bovenliggende gesteentelagen en is dus afhankelijk van de diepte. De druk die door de bovenliggende gesteentekolom wordt uitgeoefend is de lithostatische druk. Men gaat er vanuit dat deze lithostatische druk in alle richtingen een gelijk effect op de gesteenten heeft. Vandaar dat de lithostatische druk een maat is voor de alzijdige druk (confining pressure). Een gesteentekolom van 10 km. dikte gaat gepaard met een toename van de druk van 2.6 tot 3.2 kilobar. Dit is afhankelijk van de samenstelling van het gesteente (1 bar = 0.987 atm. =  $10^5$  Pa). Lithostatische druk is vaak niet voldoende voor een drastische verandering van de textuur van een gesteente. Deformatie, verandering van de textuur, vindt vooral plaats als de druk die op het gesteente uitgeoefend wordt niet meer in alle richtingen hetzelfde is maar gericht is; als het gesteente met andere woorden een deviatorische druk ondervindt. Dit gebeurt tijdens orogenesen, perioden met gebergtevorming

### 6.5.3. Typen metamorfose

De factoren die een rol spelen tijdens de metamorfose kunnen variëren qua intensiteit. De ene keer zal juist de druk een zeer grote rol spelen, een andere keer misschien alleen de temperatuur. Aan het metamorfe gesteente is vaak te zien welk metamorf proces of welke metamorfe processen het heeft meegemaakt. Twee typen metamorfose komen veel voor: regionale metamorfose en contactmetamorfose. Daarnaast worden een aantal typen metamorfose onderscheiden die slechts een lokaal belang hebben.

#### Regionale metamorfose:

Regionale metamorfose is een grootschalig, regionaal, proces waarbij in grote gebieden metamorfe gesteenten ontstaan. Dit type metamorfose treedt op tijdens orogenesen, perioden waarin gebergtevorming plaatsvindt. Tijdens regionale metamorfose vindt in eerste instantie vaak een toename van zowel de druk (deviatorische druk) als de temperatuur plaats (prograde metamorfose). De toenemende druk heeft deformatie van de aanwezige gesteenten tot gevolg, er ontstaan gesteenten die een gerichte textuur laten zien. Omdat tegelijkertijd de temperatuur toeneemt ontstaan nieuwe mineraalassenblages. De mineralen geven informatie over de temperatuur en druk die tijdens het proces geheerst hebben. Na de toename van de druk en temperatuur kan de druk en temperatuur ook weer afnemen. Dit is bijvoorbeeld het geval als tijdens de laatste fase van een orogenese een gebied langzaam wordt opgeheven en de bovenste gesteentelagen door erosie verdwijnen. Hierdoor kunnen druk en temperatuur weer afnemen. Tijdens de afname van de druk en temperatuur passen de mineralen zich opnieuw aan, er ontstaan mineraalassenblages die karakteristiek zijn voor de lagere druk en temperatuur (retrograde metamorfose).

De toename van druk en temperatuur is een langzaam proces. De textuur en de mineralogie van het gesteente passen zich langzaam aan. De daling van de temperatuur en druk, door bijvoorbeeld opheffing van een gebied, gaat sneller. Vaak te snel voor grootschalige wijzigingen van de textuur en de mineralogie. De mineralogie en de textuur die ontstaan zijn tijdens de hoogste temperatuur en druk van de prograde metamorfose blijven vaak bewaard tijdens de retrograde metamorfose.

#### Contactmetamorfose:

Contactmetamorfose is de naam voor een metamorf proces dat optreedt door stijging van de temperatuur. Drukveranderingen spelen bij dit type metamorfose eigenlijk geen rol. De plotselinge temperatuurstijging wordt veroorzaakt door de intrusie, het binnendringen, van een magmalichaam. De veranderingen die in de

aanwezige gesteenten plaatsvinden, treden direct rond het magmalichaam op, er is sprake van een kleinschalig proces. Tijdens dit proces is geen sprake van gerichte druk, er zal geen gerichte textuur ontstaan. Daar bij dit type metamorfose alleen de temperatuur een rol speelt wordt dit proces ook 'thermometa-morfose' genoemd.

#### Dynamische metamorfose:

Deze metamorfose vindt plaats langs breukzones en shearzones. De deformatie die optreedt is doorgaans zeer intens. Vergaande rekristallisatie treedt op, vaak versterkt door migratie van vloeistoffen langs de bewegingszones. Er kunnen diverse gesteenten ontstaan: zowel zeer fijnkristallijne gerekristalliseerde, 'platgewalste' gesteenten (mylonieten), als gerekristalliseerde en gebreccieerde gesteenten. De temperatuur kan lokaal zo hoog worden dat delen van de aanwezige gesteenten opsmelten, door stolling van deze smelt ontstaat glas. Deze dynamische metamorfose wordt ook 'kataklastische metamorfose' genoemd.

#### Hydrothermale metamorfose

Dit is een voorbeeld van niet-isochemische metamorfose en is vaak geassocieerd met magmatische activiteit. Tijdens de stolling van magma kunnen waterrijke oplossingen ontstaan die door de gesteenten gaan migreren en hier mineraalreacties veroorzaken.

#### Impact metamorfose

Een zeer lokaal proces dat optreedt in gesteenten tijdens de inslag van meteorieten of kometen. De inslag veroorzaakt een schokgolf die een fractie van een seconde op de gesteenten inwerkt. Deze schokgolf kan naast een plotselinge toename van de druk ook een plotselinge temperatuurstijging veroorzaken. De T kan zó hoog oplopen dat gesteenten opsmelten en als glas weer stollen. Ook kunnen mineralen ontstaan die normaliter alleen onder zeer hoge druk- en temperatuurcondities kunnen ontstaan.

De impactmetamorfose wijkt geheel af van de andere typen metamorfose, deze metamorfose is ook niet gebonden aan 'normale' processen die zich op aarde afspelen. De andere typen metamorfose zijn gebonden aan geologische processen als gebergtevorming. In bepaalde situaties is het moeilijk om een strikte scheiding te maken tussen de processen daar zij gelijktijdig of na elkaar kunnen plaatsvinden. Regionale metamorfose kan bijvoorbeeld samen gaan met dynamische metamorfose. Als gevolg van meerdere (fasen tijdens) orogenesen in hetzelfde gebied kunnen gesteenten ook meerdere malen achter elkaar regionale metamorfose ondergaan. En een orogenese gaat vaak samen met de intrusie van magmalichamen die weer contactmetamorfose kan veroorzaken. Gesteenten kunnen met andere woorden meerdere malen metamorfose ondergaan. Het ontrafelen van de metamorfe geschiedenis van een bepaald gesteente en de daarbij behorende ontrafeling van de geologische geschiedenis van een gebied is dan ook een aparte richting binnen het vakgebied van de petrologie. Daar regionale metamorfose en contactmetamorfose de belangrijkste vormen van metamorfose zijn daarover meer in de volgende paragrafen

### 6.5.4. Regionale metamorfose

De verandering van de temperatuur en de druk zijn de belangrijkste factoren tijdens deze metamorfose. Door de temperatuurverhoging worden mineralen instabiel en nieuwe mineralen gaan groeien ten koste van de instabiele mineralen. Door de verhoging van de gerichte druk treedt deformatie op van de bestaande structuur en ontstaat een nieuwe textuur. Een samenspel van een aantal processen die al dan niet gelijktijdig optreden levert de uiteindelijke metamorfe gesteenten.

#### 6.5.4.1. Processen die de textuur van het gesteente kunnen beïnvloeden:

##### De kristallen worden kleiner:

Kristallen die niet ideaal gepositioneerd zijn ten opzichte van de gerichte druk kunnen, als gevolg van ionentransport over kleine afstanden, langzaam verdwijnen. De ionen zullen opgenomen worden in kristallen die wél goed liggen ten opzichte van de druk en die zo kunnen uitgroeien. Daarnaast kunnen kristallen rekristalliseren en zodoende overgaan in een maaksel van kleinere kristallen. Kwarts is een mineraal dat onder invloed van druk snel gaat rekristalliseren: één kristal kan overgaan in veel kleine kristalletjes. In het ideale geval ontstaat tijdens dit proces een polygonale textuur. Alkaliveldspaten daarentegen kunnen gerichte druk lang weerstaan.

De kristallen worden groter:

Kristallen kunnen tijdens de metamorfose uitgroeien. Dit gaat ten koste van de kristallen die niet gunstig georiënteerd zijn t.o.v. de druk. Tijdens het proces kunnen ook geheel nieuwe kristallen ontstaan en uitgroeien. Deze nieuwe kristallen kunnen qua grootte overeen komen met de grootte van de omringende kristallen. Ze kunnen echter ook uitgroeien tot relatief grote kristallen, dit worden porfierblasten genoemd. Er zijn diverse mineralen die alleen stabiel zijn onder metamorfe condities, ze zijn dus karakteristiek voor metamorfe gesteenten. Voorbeelden zijn andalusiet, kyaniet, sillimaniet, granaat, actinoliet, cordieriet, glaucofaan en anderen. Deze mineralen vormen vaak porfierblasten in het metamorfe gesteente.

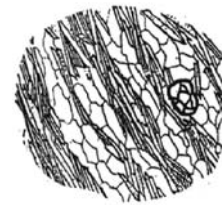
Korrelvertanding

Soms worden korrels van mineralen tijdens de gerichte druk in elkaar gedrukt. Dit proces kan optreden in een zandsteen die zo goed als geheel uit korrels kwarts is opgebouwd. Door de druk worden de korrels in elkaar geduwd (kleinere kromtestraal in grotere kromtestraal), er ontstaat een gesteente dat uit in elkaar geperste kwartskorrels bestaat. Dit gesteente wordt een kwartsiet genoemd.

Oriëntatie van de kristallen

Kristallen die een bijna ideale oriëntatie ten opzichte van de heersende druk hebben kunnen zich heroriënteren en een ideale positie innemen. Kristallen die nieuw in het gesteente ontstaan, terwijl er een gerichte druk op het gesteente uitgeoefend wordt, zullen meteen een ideale positie ten opzichte van de drukrichting aannemen. Plaatvormige mineralen, onder andere glimmers, zullen zodanig groeien, of uitgroeien, dat de plaatjes loodrecht op de druk georiënteerd zijn. Ook andere mineralen zullen een preferente oriëntatie aannemen.

Dit proces waarbij heroriëntatie en georiënteerde nieuwgroei van kristallen optreedt, zal meer effect hebben naarmate de gerichte druk hoger is en langer aanhoudt. De georiënteerde textuur van het gesteente is het beste te zien als veel plaatvormige mineralen, zoals glimmers, aanwezig zijn. De textuur waarin een duidelijke preferente oriëntatie van de mineralen te zien is wordt 'foliatie' genoemd. Dit is een algemene benaming voor elke gerichte textuur in een metamorf gesteente. De foliatie kan gespecificeerd worden als de grootte van de kristallen en het uiterlijk van de foliatie worden meegenomen (zie 6.5.4.2). Ook langgerekte kristallen krijgen tijdens de gerichte druk een preferente oriëntatie: dit wordt 'lineatie' genoemd.



#### 6.5.4.2. De naamgeving van regionaal metamorfe gesteenten

De foliatie is zeer karakteristiek voor regionaal metamorfe gesteenten. Hoe de foliatie zich ontwikkelt is afhankelijk van de duur van het proces, de hoogte van de temperatuur, de druk, de chemie van het gesteente. Afhankelijk van deze factoren ontstaat een bepaalde foliatie en een bepaalde kristalgrootte. Een zeer fijngepatieerde foliatie in een zeer fijnkristallijn gesteente wordt ook wel een 'leisplijting' (slaty cleavage) genoemd. Neemt de kristalgrootte toe en ook de spatiering dat wordt de foliatie ook 'schistositeit' genoemd. Voor een deel van de metamorfe gesteenten is de naamgeving afhankelijk van de ontwikkeling van de foliatie en de vaak daarmee samenhangende grootte van de kristallen. Deze naamgeving hangt dus niet af van de mineralogie maar van de textuur van het gesteente:

leisteen	Het gesteente heeft een strakke, fijngespatieerde, foliatie, deze wordt in een leisteen ook wel 'splijting' (leisteensplijting of slaty cleavage) genoemd. Het gesteente splijt hierlangs gemakkelijk. Een leisteen is zeer fijnkristallijn en bestaat voornamelijk uit zeer kleine, met het oog niet-waarneembare kristalletjes van vooral glimmers.
fylliet	Een fylliet lijkt op een leisteen. De kristallen, voornamelijk glimmers, zijn groter hoewel dit met het blote oog nauwelijks te zien is. De foliatie is nog steeds strak, echter vaak iets onregelmatiger dan die van een leisteen. Op de splijtvlakken laten de glimmers vaak een zijdeglans zien.
schist	De afzonderlijke kristallen zijn in een schist goed te onderscheiden. De foliatie is, afhankelijk van de kristalgrootte, redelijk strak tot zeer onregelmatig. Naast glimmers zijn in een schist ook felsische mineralen te onderscheiden, vaak is dit kwarts, in mindere mate kunnen veld-

spaten aanwezig zijn. De foliatie in een schist wordt ook wel 'schistositeit' genoemd. Hoe meer glimmers aanwezig zijn des te duidelijker is de schistositeit. Naast, of in plaats van glimmers, kunnen ook prismatische mineralen aanwezig zijn zoals bijvoorbeeld amfibolen. Deze prismatische mineralen geven een minder duidelijke foliatie, maar een preferente oriëntatie van de mineralen is meestal goed zichtbaar (lineatie).

**gneis** De foliatie is in een gneis minder goed ontwikkeld dan in een schist. De foliatie wordt schistositeit of gneisiteit genoemd. Het gesteente heeft een gebande textuur, de banden bestaan afwisselend uit mafische en felsische mineralen. Als felsische mineralen zijn kwarts en veldspaten herkenbaar. De veldspaten vormen, in tegenstelling tot in een schist, een belangrijk aandeel in het gesteente.

In de praktijk zijn de overgangen tussen deze gesteenten gradueel, hetgeen de naamgeving bemoeilijkt. Het interpreteren van de textuur kan ook bemoeilijkt worden door de aanwezigheid van porfierblasten. Porfierblasten die tijdens een deformatiefase groeien krijgen een preferente oriëntatie. Groeien de porfierblasten echter uit na het beëindigen van een periode met verhoogde gerichte druk dan zullen de kristallen een willekeurige oriëntatie krijgen. Deze willekeurig georiënteerde porfierblasten kunnen de aanwezige foliatie verdoezelen.

De mineraalinhoud is bij de bepaling van de bovengenoemde gesteentenamen dus van ondergeschikt belang. Als aan de hand van de textuur de gesteentenaam bepaald is kan deze naam met behulp van de mineralogie gespecificeerd worden, zoals bijvoorbeeld muscovietschist, hoornblendegneis of chlorietfylliet.

Goed gefolieerde gesteenten, zoals de genoemde leisteen, fylliet, schist en gneis, zijn de meest voorkomende regionaal metamorfe gesteenten. Daarnaast bestaan nog andere regionaal metamorfe gesteenten die niet in dit rijtje thuishoren, doordat hun genese, of mineralogische samenstelling afwijkt. Zoals:

**amfiboliet** In amfibolieten zijn twee hoofdmineralen aanwezig: een plagioklaas en een amfibool. Het gesteente kan ontstaan door metamorfose van onder andere een dioriet of gabbro. Doordat de druk niet hoog genoeg was, of niet lang genoeg heeft aangehouden, is geen foliatie ontstaan. Het gesteente heeft wel een andere mineralogie gekregen maar de textuur van het oorspronkelijke gesteente is bewaard gebleven. Als de oorspronkelijke magmatische textuur nog herkenbaar is kan dit in de naamgeving verwerkt worden: metadioriet, metagabbro (meta(morfe)gabbro).

**eclogiet** Metamorfe gesteente dat alleen bij een zeer hoge druk en temperatuur kan ontstaan door de metamorfose van basische gesteenten. Het gesteente heeft een opvallende kleur daar als hoofdmineralen een groene pyroxeen (omphaciet) en een rode granaat (pyroop) aanwezig zijn.

**blauwschist** Ofwel glaucofaanschist. Metamorfe gesteente dat alleen bij zeer hoge druk en lage temperatuur kan ontstaan (subductiezones) door de metamorfose van basische gesteenten. Karakteristiek voor dit gesteente is het mineraal glaucofaan dat aan het gesteente een blauwe of paarsblauwe glans kan geven

**granofels** Ook granuliet genoemd. Een metamorfe gesteente dat kan ontstaan door verdergaande metamorfose van schisten en gneizen. De temperatuur is dan eigenlijk al zo hoog dat bepaalde mineralen niet meer stabiel zijn en gaan smelten. Vooral waterhoudende mineralen, zoals amfibolen en glimmers, zijn dan niet meer stabiel en gaan smelten. Een granofels kan dus alleen ontstaan als in het gesteente geen waterhoudende mineralen aanwezig zijn. Het gesteente bestaat uit een zeer sterk gerekristalliseerd maaksel van kwarts, veldspaten, pyroxenen en andere mineralen die bij de hoge temperatuur stabiel zijn. De foliatie kan in een granofels slecht ontwikkeld zijn, of zelfs geheel afwezig zijn.

**groenschist** Dit is een speciale schist die ontstaat door metamorfose van bazalt of bazaltachtige gesteenten. Er ontstaan vooral groene mineralen zoals epidoot, klinozoisiet, actinoliet en chloriet. Deze groene mineralen zijn prismatisch met uitzondering van chloriet, een preferente oriëntatie is duidelijk aanwezig. Chloriet is het enige plaatvormige mineraal. De chlorietkristallen zijn echter klein en geven het gesteente geen strakke foliatie.

kwartsiet	Officieel is een kwartsiet een metamorf gesteente dat geheel of bijna geheel uit kwarts bestaat. Vaak echter wordt de naam kwartsiet specifiek gebruikt voor het gesteente dat ontstaat door metamorfose van een kwartsrijke zandsteen. Doordat in deze zandsteen kleimineralen ontbreken zijn tijdens de metamorfose geen glimmers gevormd, en dus is geen duidelijk gefolieerd gesteente ontstaan. De aanwezige kwartskorrels zijn in elkaar gedruwd waardoor een bijzonder taai en sterk gesteente, zonder foliatie, ontstaan is: een kwartsiet.
marmar	Marmar ontstaat door metamorfose van kalksteen. Tijdens de metamorfose van kalksteen vindt rekristallisatie plaats en verdwijnen de oorspronkelijke sedimentaire structuren. Er ontstaat een kristallijn maaksel dat afhankelijk van de oorspronkelijke chemische samenstelling zowel uit calciet als uit dolomiet kan bestaan. Indien de kristallen een preferente oriëntatie hebben aangenomen tijdens de rekristallisatie kan een foliatie zichtbaar zijn; vaak echter is de foliatie afwezig.
migmatiet	Een migmatiet is een overgangsgesteente tussen metamorfe en magmatische gesteenten. De temperatuur is tijdens de metamorfose zó gestegen dat een deel van de aanwezige mineralen is gaan smelten, een deel is echter vast gebleven. Het deel dat vast is gebleven laat een foliatie zien. Het deel dat gesmolten is stolt als een magmatisch gesteente. Deze magmatische delen, die doorgaans een granietische samenstelling hebben, bevinden zich in slierten tussen de gefolieerde delen in.
serpentieniet	Een gesteente dat voornamelijk uit het mineraal serpentijn bestaat. Het is ontstaan door metamorfose van olivijnrijke gesteenten.

#### 6.5.4.3. De vormingscondities van regionaal metamorfe gesteenten

Op het moment dat gesteenten een metamorfose ondergaan vindt rekristallisatie plaats, er ontstaan nieuwe mineralen. Op het moment van rekristallisatie zijn de mineralen in evenwicht met elkaar én met de heersende condities (p en T). Er is met andere woorden een chemisch evenwicht. Door een metamorf gesteente als een chemisch systeem te zien kan het verhaal omgekeerd worden: de aanwezige mineralen geven informatie over de condities waaronder het gesteente ontstaan is. De metamorfe geschiedenis, inclusief de deformatiegeschiedenis, van soms grote gebieden kan zo ontrafeld worden. De aanwezigheid van bepaalde assemblages van mineralen wordt bepaald door de wetten van de thermodynamica. De faseregule (F = C-P + 2) speelt hierbij een belangrijke rol evenals de energie regulatie (Gibbs free energy, entropy, enthalpie).

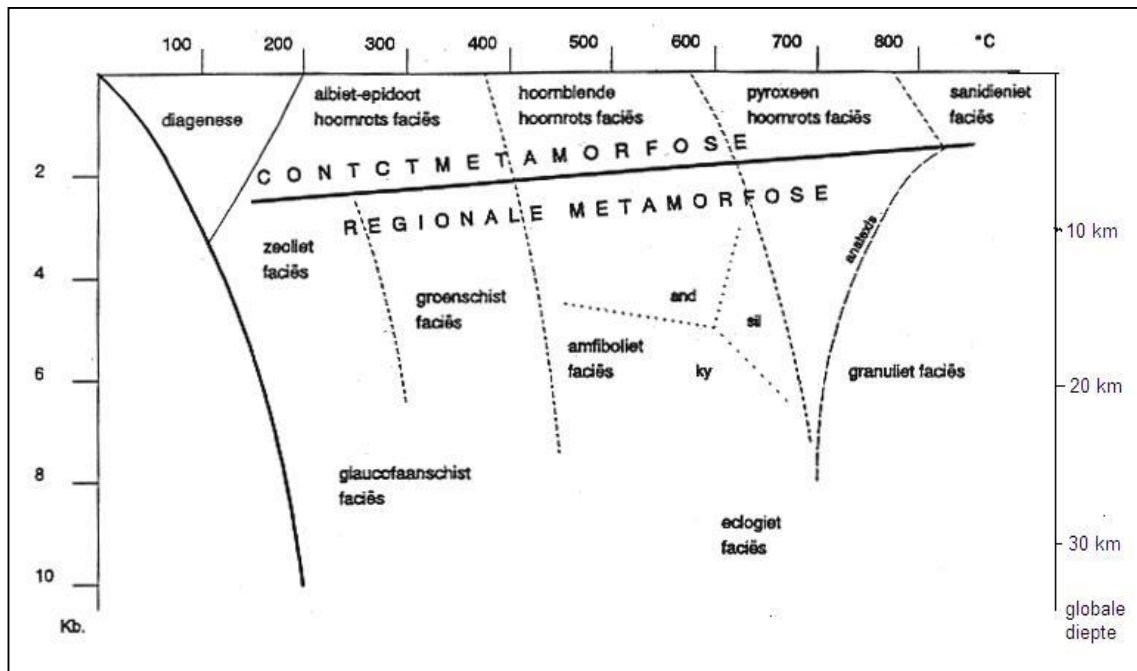
Zolang de mineralen die in een gesteente aanwezig zijn in evenwicht zijn met de heersende druk en temperatuur gebeurt er niets. Zodra de p- en T-condities veranderen wordt het evenwicht verstoord. Sommige mineralen zullen als gevolg hiervan verdwijnen. Nieuwe mineralen kunnen verschijnen. Er treden mineraalreacties op waardoor een nieuw assemblage mineralen ontstaat dat wel in evenwicht is met de veranderde condities. Er van uitgaande dat de chemie van het gesteente gelijk blijft geven verschillende fysische condities tijdens de metamorfose verschillende mineraalassenblages. Twee gesteenten, met een verschillende mineraalinhoud maar met dezelfde chemie, geven na metamorfose onder dezelfde condities een gesteente met dezelfde mineraalinhoud.

Bepaalde fysische condities kunnen dus een bepaalde groep mineralen tot gevolg hebben. Voor deze groep mineralen, die in evenwicht is met een bepaalde range van fysische condities (p en T), is het begrip 'faciës' geïntroduceerd. Een faciës is dus niets anders dan een groep mineralen die onder dezelfde metamorfe condities kan ontstaan, mits de chemie van het gesteente de vorming van deze mineralen toelaat.

Andersom gaat natuurlijk ook op. Zijn de aanwezige mineralen bekend dan kan aangegeven worden tot welke faciës deze behoren. Uit deze faciës zijn globaal de vormingscondities, de p- en T-condities, van het gesteente te achterhalen. Deze gegevens geven weer informatie over de geologische geschiedenis van het gebied.

De faciës die op dit moment worden gebruikt zijn door H.G.F. Winkler van een naam voorzien en uitgezet in een p-T-diagram, dit wordt de faciësclassificatie van Winkler genoemd (zie figuur 40).





Figuur 40: de faciësclassificatie van Winkler

Zeoliet faciës. Mineralen uit de zeolietgroep (laumontiet, heulandiet) zijn karakteristiek voor deze faciës. Deze mineralen kunnen in bepaalde gesteenten ontstaan als de temperatuur de 200°C overschrijdt.

Prehniet-pumpellyiet faciës. Een overgangsfaciës naar de groenshistfaciës. Prehniet en pumpellyiet zijn de karakteristieke mineralen voor deze faciësgroep.

Groenshist faciës. Genoemd naar een gesteente en wel naar een groenshist. De mineralen die karakteristiek zijn voor deze faciës zijn de groene mineralen actinoliet, epidoot en chloriet

Epidoot-amfiboliet faciës. Overgangsfaciës naar amfibolietfaciës: albiet, epidoot en blauwgroene hoornblende zijn de karakteristieke mineralen.

Amfiboliet faciës. Genoemd naar een gesteente en wel naar een amfiboliet. De mineralen die karakteristiek zijn voor deze faciës zijn o.a. hoornblende, plagioklaas (%An > 17), kyaniet, stauroliet en sillimaniet. Let op: het gesteente 'amfiboliet' hoeft niet noodzakelijkerwijs onder amfibolietfaciës-condities ontstaan te zijn.

Granuliet faciës. Genoemd naar een gesteente en wel naar een granuliet (=granofels). Opvallend voor gesteenten uit deze faciës is de afwezigheid van waterhoudende mineralen. Waterhoudende mineralen/gesteenten zijn bij deze hoge T en p niet meer stabiel en zullen opsmelten. Mineralen: clinopyroxeen, orthopyroxeen, plagioklaas, granaat .

Glaucofaanshist faciës. Genoemd naar een gesteente en wel naar een glaucofaanshist (=blauwschist). Deze lage-T/hoge-p faciës is karakteristiek voor subductiezones. Karakteristieke mineraal: glaucofaan.

Eclogiet faciës. Genoemd naar een gesteente en wel naar eclogiet, het enige gesteente dat bekend is uit deze faciës. Karakteristieke mineralen: omphaciet, granaat (pyroop)

Door de mineraalinhoud van een metamorf gesteente te bestuderen en deze te vergelijken met de mineralen die in de verschillende faciës voorkomen kan een goede indicatie gegeven worden van de vormingscondities. Vakmensen zeggen gewoonlijk: 'het gesteente is onder groenshistfaciës condities ontstaan'. Zonder het specifieke p- en T-traject te noemen weet dan iedereen globaal onder welke condities het gesteente ontstaan is. In onderstaande tabel (figuur 41) wordt een summier overzicht gegeven van een aantal mineralen die specifieke informatie over de belangrijkste faciës geven (er kunnen dus ook mineralen in het gesteente voorkomen die niet op de lijst staan). Let op: soms is één mineraal al voldoende om te kunnen zeggen tot welke faciës het gesteente behoort, soms zegt één mineraal helemaal niets (granaat bijvoorbeeld staat bij vier faciës vermeld). Welke mineralen precies ontstaan wordt in eerste instantie bepaald door de chemie. Is deze niet geschikt voor de vorming van karakteristieke mineralen als bijvoorbeeld stauroliet of kyaniet dan zullen deze mineralen ook niet ontstaan, ook al waren de juiste p en T tijdens de metamorfose aanwezig.

In veel literatuur wordt de faciësclassificatie van Winkler gehanteerd. Winkler zelf, met hem vele anderen, heeft deze classificatie in zekere zin al weer afgeschaft en vervangen door onderstaande classificatie:

zeoliet faciës:	zeer laaggradige metamorfose	(very low grade)
prehniet-pumpellyiet faciës:	zeer laaggradige metamorfose	(very low grade)
groenschist faciës:	laaggradige metamorfose	(low grade)
amfiboliet faciës:	middelmatige graad van metamorfose	(medium grade)
granuliet faciës:	hooggradige metamorfose	(high grade)
glaucofaanschist faciës:	hooggradige metamorfose	(high grade)
eclogiet faciës:	zeer hooggradige metamorfose	(very high grade)

groenschist f.	amfiboliet f.	granuliet f.	glaucofaanschist f.	eclogiet f.
chloriet serpentijn actinoliet plag (an <sub>5-10</sub> ) andalusiet epidoot muscoviet biotiet granaat	muscoviet biotiet granaat stauroliet hoornblende kyaniet plag (an <sub>10-50</sub> ) cpx: augiet sillimaniet	kyaniet plag (an <sub>10-50</sub> ) cpx: augiet sillimaniet orthopyroxeen granaat	glaucofaan  cpx: jadeiet	cpx: omphaciet  granaat (pyroop)

Figuur 41: overzicht van de belangrijkste mineralen in regionaal metamorfe faciës.

### 6.5.5. Contactmetamorfose

Contactmetamorfose is de naam voor een metamorf proces dat optreedt door stijging van de temperatuur. Drukveranderingen spelen bij dit type metamorfose eigenlijk geen rol. De plotselinge temperatuurstijging wordt veroorzaakt door de intrusie, het binnendringen, van een magmalichaam. De veranderingen die in de aanwezige gesteenten plaatsvinden treden direct rond het magmalichaam op: er is sprake van een kleinschalig proces.

Door de plotselinge temperatuurstijging treden in het oorspronkelijke gesteente veranderingen op. Het gesteente gaat rekrystalliseren. Er treedt een verandering van zowel de textuur als de mineralogie op. De veranderingen die in de textuur kunnen optreden vertonen overeenkomsten met de veranderingen die in regionaal metamorfe gesteenten kunnen optreden. De kristallen kunnen kleiner worden, groter worden en nieuwe mineralen kunnen ontstaan. Ook porfierblasten kunnen in dergelijke gesteenten ontstaan. De kristallen die in een contactmetamorf gesteente ontstaan, zullen echter in de meeste gevallen zeer klein blijven. Zo klein, dat ze met het oog, en zelfs met een loep, vaak niet herkenbaar zijn. Ook de porfierblasten blijven over het algemeen klein. Een enkele keer ontstaan porfierblasten in clusters. Deze clusters waarin dan diverse mineralen aanwezig kunnen zijn vormen kleine vlekjes in het gesteente ('vlekje', 'nopjesschist'). Daar gerichte druk tijdens de contactmetamorfose geen rol speelt zal in normale gevallen in een contactmetamorf gesteente geen foliatie aanwezig zijn. Was het oorspronkelijke gesteente echter sterk gelaagd of gefolieerd dan kan deze oorspronkelijke textuur in het nieuwe gesteente nog zichtbaar zijn.

Welke veranderingen precies optreden en hoe het contactmetamorf gesteente er precies uit gaat zien is afhankelijk van het temperatuurverloop en van het oorspronkelijke gesteente. Gesteenten waarvan de vormingscondities sterk afwijken van die condities die tijdens de contactmetamorfose heersen, zullen de grootste veranderingen laten zien.

In het algemeen zijn de gesteenten die tijdens contactmetamorfose ontstaan zeer fijnkristallijn. Zij hebben een ongerichte textuur en vaak een bruine, grijszwarte, of zwarte kleur. Dergelijke contactmetamorfe gesteenten worden 'hoornrots' genoemd.

Ook tijdens contactmetamorfose kunnen mineralen ontstaan die informatie geven over de vormingscondities van het gesteente. Ook voor deze groep gesteenten zijn faciës benoemd. De contactmetamorfe faciës staan in het diagram van Winkler (figuur 40) bovenaan, ze worden alle gekarakteriseerd door een lage druk terwijl de temperatuur varieert.

Met uitzondering van de sanidiniëtfaciës worden deze faciës alle hoornrotsfaciës genoemd. Aan het voorvoegsel is te zien welke mineralen karakteristiek zijn:

- albiet-epidoot hoornrotsfaciës
- hoornblende hoornrotsfaciës
- pyroxeen hoornrotsfaciës
- sanidiniëtfaciës

In de praktijk is het zeer moeilijk om de graad van metamorfose van de contactmetamorfe gesteente te bepalen. Over het algemeen zijn de kristallen zo klein dat positieve identificatie onmogelijk is.

### 6.5.6. Korte beschrijving van de belangrijkste metamorfe gesteenten

De belangrijkste regionaal metamorfe gesteenten staan beschreven in paragraaf 6.5.4.2. (blz. 106 t/m 108). De belangrijkste contactmetamorfe gesteenten staan beschreven in paragraaf 6.5.5 (blz. 111).

## 6.6. Het practicum

Tijdens dit practicumonderdeel zullen gesteenten zowel macroscopisch als microscopisch bestudeerd worden. De verschillende gesteentegroepen komen één voor één aan bod. Bij het bestuderen van zowel de dd's als de handstukken verdient het aanbeveling om de tentamenformulieren als leidraad te gebruiken (zie blz. 8 t/m 10). Er is tevens een bijlage verkrijgbaar waarin de belangrijkste mineralen microscopische beschreven staan.

### 6.6.1. Magmatische gesteenten

Hieronder volgt een lijst van de gesteenten die aanwezig zijn. Dit is tevens de tentamenstof voor de magmatische gesteenten. De nummers verwijzen naar de nummers van de collectie 'slijpplaatjes magmatische gesteenten'.

<b>Dieptegesteenten (intrusieve gest.):</b>	<b>dd-nummer:</b>
apliet	49
dioriet	26, 27, 29
gabbro	28, 32, 35
graniet	1, 2, 3, 4, 7
pegmatiet	52
syeniet	16, 17, 19, 21, 50
ultramafisch gesteente	37, 39, 41
<b>Vulkanische gesteenten (extrusieve gesteenten):</b>	
andesiet	82, 84
bazalt	94, 95, 96
fonoliet	75, 78, MT19
puimsteen	nvt
rhyoliet	59, 60, 61, 62, 63
tefriet	MT46
trachiet/latiet	70, 73
vulkanisch glas	67

### 6.6.2. Sedimentaire gesteenten

Hieronder volgt een lijst van de gesteenten die aanwezig zijn. Dit is tevens de tentamenstof voor de sedimentaire gesteenten. De nummers verwijzen naar de nummers van de collectie 'slijpplaatjes sedimentaire gesteenten'.

Sedimentaire gesteenten:	dd-nummer:
antraciet	Nvt
bauxiet	Nvt
breccie	
bruinkool	
conglomeraat	4
kalksteen	12, 13, 15, MT10, MT109, 2856t/m2875
kleisteen	17
lateriet	
schalie	17
steenzout	
zand	
zandsteen	5, 6, 8, 9, MT12, MT108, 2815 t/m 2845

### 6.6.3. Metamorfe gesteenten

In metamorfe gesteenten kunnen mineralen voorkomen die tot nu toe nog niet microscopisch aan de orde zijn gekomen. Wél zijn de belangrijkste hiervan macroscopisch bestudeerd tijdens ta1900-deel 3. Voor de microscopische bestudering van deze mineralen wordt de slijpplaatjescollectie 'mineralen in gesteenten' gebruikt. De volgende mineralen behoren tot de tentamenstof:

Metamorfe mineralen:	dd-nummer:
epidoot	52
klinozoïsieet	53
chloriet	41
glaucofaan	34
actinoliet	31
andalusiet	64, 65, 67
kyaniet	70
sillimaniet	68, 69
granaat	49, 50, 51
stauroliet	71

Hieronder volgt een lijst van de metamorfe gesteenten die aanwezig zijn. Dit is tevens de tentamenstof. De nummers verwijzen naar de nummers van de collectie 'slijpplaatjes metamorfe gesteenten'.

Metamorfe gesteenten:	dd-nummer:
amfiboliet	74, 75
eclogiet	79
fylliet	5, 6, 7, 8, 52, 55
glaucofaanschist	57
gneis	14, 15, 18, 19, 21, 44, 62, 73, 89
groenschist	
hoornrots	37, 100
kwartsiet	94, 98
leisteen	10 (uit de collectie magm. Gest.)
marmer	53, 92
schist	2, 3, 40, 42, 45, 47, 54, 64, 67, 77, 89

Tijdens de microscopische bestudering van de metamorfe gesteenten kan gebruik gemaakt worden van de lijst op blz. 113 .

Gesteente	dd	Belangrijkste mineralen	Faciës
amfiboliet	74	act	Groenschist
	75	hbl, hbl	Amfiboliet
eclogiet	79	cpx, gt, ky, q	Eclogiet
fylliet	5	mus, q, albiet	Groenschist
	6	mus, q, gr	Groenschist
	7	mus, chl, gr	Groenschist
	8	mus, q, chl, gr, cc	Groenschist
	52	chl, bi	Groenschist
	55	mus, q, chld	Groenschist
gneis	14	q, plag, kvs, mus	Amfiboliet
	15	q, plag, bi, gt	Amfiboliet
	18	q, plag, kvs, sil, gt, (cord)	Amfiboliet
	19	q, plag, sil, (cord)	Amfiboliet
	21	q, plag, kvs, bi, gr	Groenschist of amfiboliet
	44	q, plag, mus, bi, gt	Groenschist
	62	q, plag, hbl, bi	Amfiboliet
	73	cpx, plag, hbl	Amfiboliet
	89	q, plag, gt, sil, bi, mus, kvs	Amfiboliet
hoornrots	37	q, plag, mus, bi, (cord?)	hbl hoornrots
	100	mus, chl, (cord?)	hbl hoornrots
kwartsiet	94	q	?
	98	q, cc, opaak	?
leisteen	10	mus	Groenschist
marmers	53	cc, mus	?
	92	cc, q	?
schist	2	mus, q, plag, cc	Groenschist
	3	mus, q, plag, chl, gr, gt	Groenschist
	40	mus, q, plag, bi	Groenschist
	41	mus, q, plag, bi, gt	Groenschist
	42	mus, bi	?
	43	mus, q, plag, stt, ky	Amfiboliet
	45	mus, q, plag, bi, stt, gt	Amfiboliet
	46	mus, q, plag, bi, stt	Amfiboliet
	47	mus, q, plag, bi, stt, (cord?)	Amfiboliet
	54	mus, q, plag, stt, (cord?)	Amfiboliet
	57	glau, kl.z, ep, plag, cc, cpx, chl	glaucofaanschist
	64	mus, chl, act, plag, ep, (tit)	Groenschist
	65	mus, q, bi, stt, gt	Amfiboliet
	67	trem, chl	Groenschist
	70	chl, plag, ep, kl.z, cc, (tit)	Groenschist
	77	talk, chl, trem	Groenschist
	78	act, plag, ep, kl.z, chl, (tit)	Groenschist
	87	chl	Groenschist

Gebruikte afkortingen:

act	actinoliet	ep	epidoot	plag	plagioklaas
alb	albiet	glau	glaucofaan	Q	kwarts
bi	biotiet	gr	grafiet	sil	sillimaniet
cc	calciet	gt	granaat	stt	stauroliet
chl	chloriet	hbl	hoornblende	tit	titaniet
chld	chloritoied	kl.z	klinozoisiet	trem	tremolet
cord	cordieriet	kvs	alkaliveldspaat		
cpx	clinopyroxeen	ky	kyaniet		

#### 6.6.4. Het tentamen ta1900- deel 5

Tijdens dit tentamen moeten gesteenten zowel microscopisch als macroscopisch beschreven worden. Voor het deeltentamen microscopie worden twee dd's, met de bijbehorende handstukken, uitgedeeld. Voor het deeltentamen macroscopie krijg je een bak met 8 handstukken (zonder dd's). Voorbeelden van de tentamenformulieren zijn te vinden op bladzijden 8 t/m 10. Hier staat ook beschreven welke figuren tijdens het tentamen gebruikt mogen worden.



## 2. fasendiagram plagioklaas

Box 15-1

### Crystallization of Plagioclase Feldspars

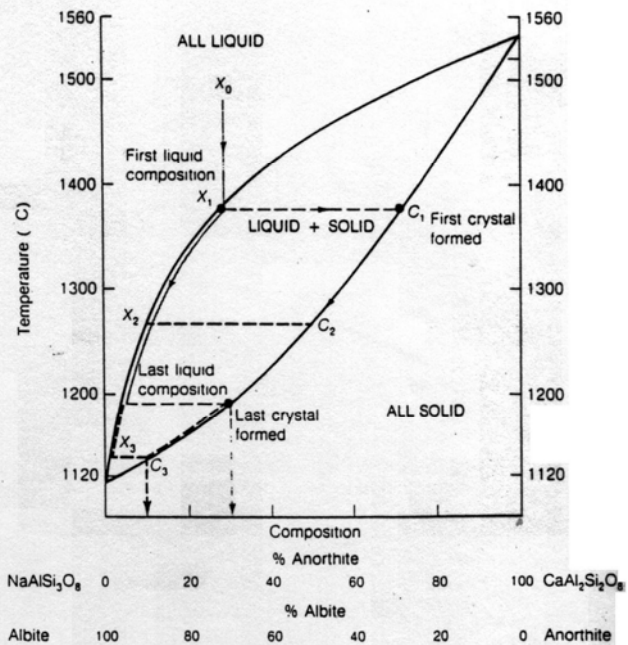
The figure summarizes the results of many crystallization experiments with melts of compositions corresponding to those of various members of the plagioclase series. The chemical composition is shown on the horizontal axis of the graph as the percentage of the two components, albite and anorthite, in a simple mixture of the two. Natural plagioclases are a solid-solution series; that is, there is a continuous range of compositions from one side to the other, the basic crystal structure remaining the same throughout (see Table 3-2). The melts of albite and anorthite are completely miscible in all proportions, as are the solid minerals.

Because we are interested in temperatures of crystallization, we have plotted temperature on the vertical axis. The graph tells us what to expect if a melt of composition  $X$  (about 30% anorthite), heated to about 1500°C, is allowed to cool slowly. There is no change as the liquid cools until a temperature of about 1370°C is reached. At that point the first crystals of plagioclase form. These crystals are very different in composition from the liquid; they turn out to be a little over 70% anorthite. As the first crystals form, because the proportion of anor-

thite to albite being taken out of the melt is much higher than the original composition at  $X$ , the liquid becomes a little depleted in anorthite and starts to move down the upper curve.

As more crystals grow, they form from a liquid of slightly changed composition and so are a little less rich in anorthite. In the meantime, the first-formed crystals are no longer in equilibrium with the liquid because the melt is now more albitic. If crystallization is very slow, these first crystals will continuously react with the changing liquid; and as new crystals form, the composition of all of the crystals will travel down the lower curve. This process continues—the liquid moving down the upper curve and the solid moving down the lower curve—until, at a temperature of about 1190°C, the last drop of liquid (by now containing only about 5% anorthite) forms crystals of the original composition,  $X$ . After that, the entire crystalline mass continues to cool without further change. The melt has crystallized into a plagioclase of the same composition as the original melt, but by a complicated route. When a solid plagioclase is melted, it follows exactly the same route in reverse. The first liquid formed is of the same composition as the last drop of liquid in the crystallization process, the liquid and crystals move up their respective curves until the last crystal is melted, when the liquid attains the composition  $X$ .

Crystallization diagram for the cooling of a plagioclase feldspar melt. The original melt at composition  $X_0$  (about 30% anorthite) cools to a temperature of about 1370°C ( $X_1$ ), at which point the first crystal of composition  $C_1$  is formed. As successive crystals are formed, the liquid changes in composition to that indicated by point  $X_2$ , at which time all crystals have reacted to form crystals of composition  $C_2$ . If crystals continue to react with the melt, the liquid moves down the curve to about 1190°C, the point at which the last liquid forms a crystal with the composition of the original melt. If crystals of composition  $C_2$  are withdrawn at this point, before they react, the liquid will change to composition  $X_3$ , and the final crystal will be composition  $C_3$ .

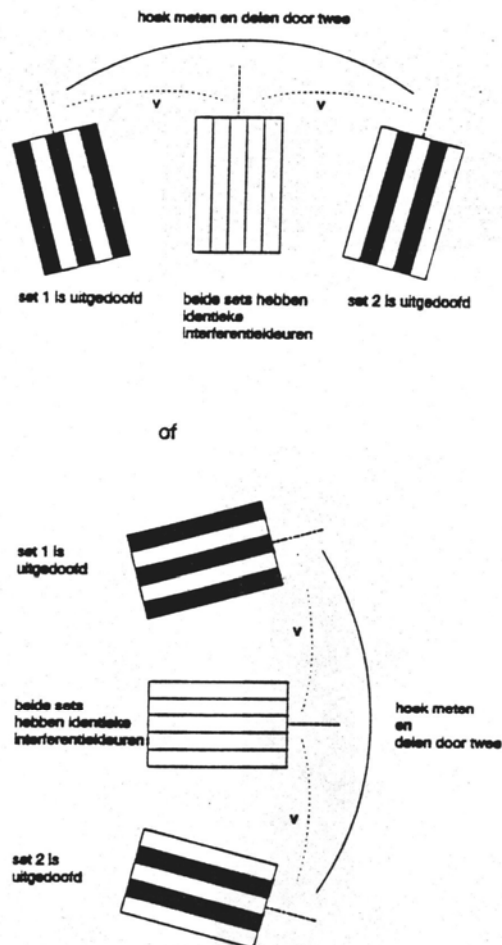


Uit: Press & Siever. Earth (1986)

### 3. Procedure voor de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas I

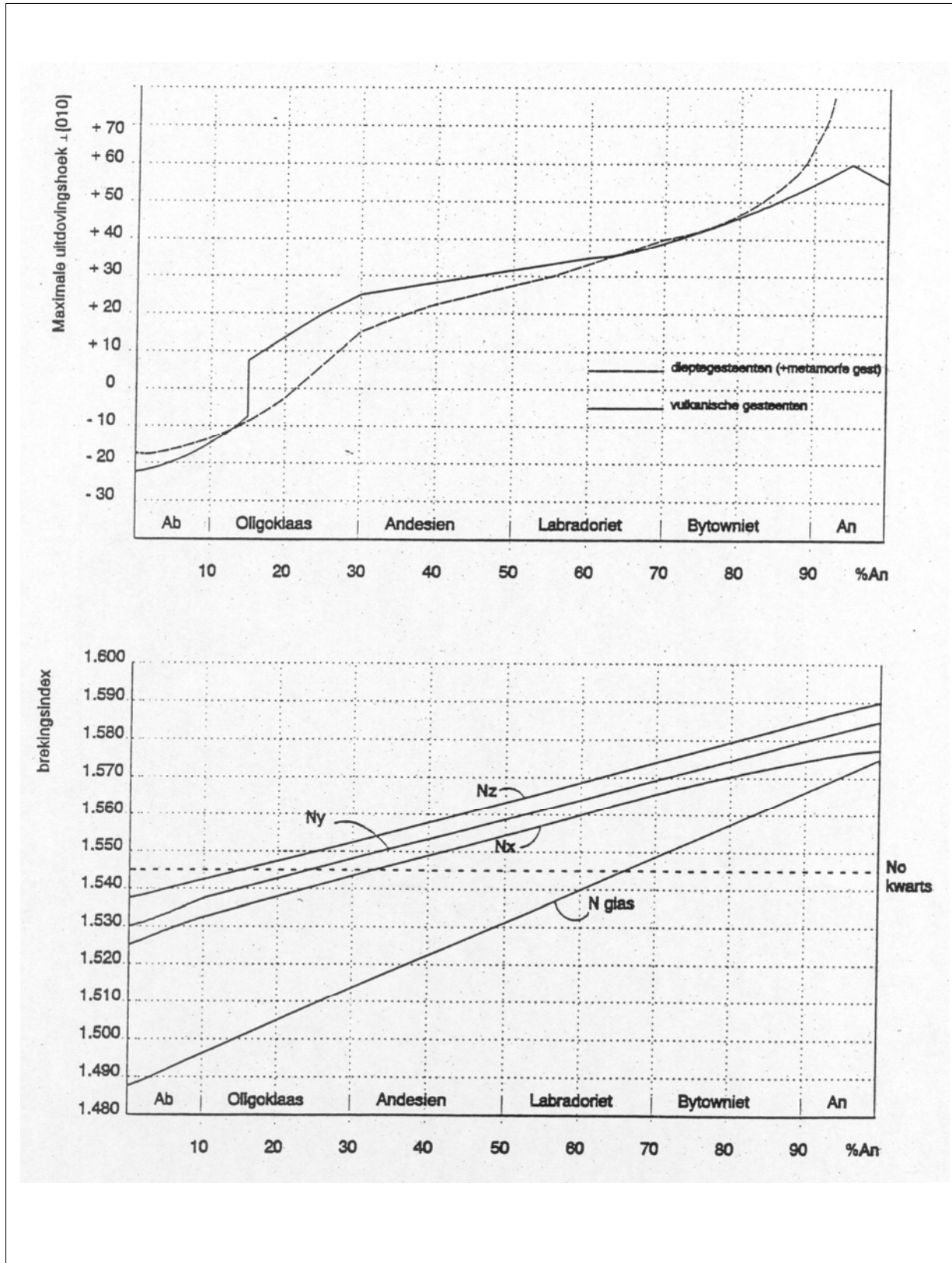
Procedure voor de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas :

- 1 : Zoek een plagioklaas doorsnede waarin de lamelbegrenzingsen scherp zijn. Bij draaiing van de tafel mogen de begrenzingen niet van plaats veranderen
- 2 : Indien de lamellen noord-zuid of oost-west liggen moeten de twee sets lamellen dezelfde interferentiekleur hebben. Is dit niet zo dan is de doorsnede niet geschikt voor de bepaling van de samenstelling.
- 3 : Controleer of de twee sets lamellen symmetrisch uitdoven t.o.v. de noord-zuid of de oost-west stand. Is de afwijking meer dan  $5^\circ$  dan is ook deze doorsnede niet geschikt. Is de afwijking minder dan  $5^\circ$  dan kan de procedure vervolgd worden.
- 4 : Meet de hoek die aanwezig is tussen de uitdovingsstand van de ene set lamellen en de uitdovingsstand van de andere set lamellen. Deel deze hoek door twee. U heeft nu de gemiddelde uitdovingshoek van de twee sets lamellen.
- 5 : Herhaal de procedure enige malen (min. 3 maal). Van de gevonden uitdovingshoeken neemt u de hoogste. De bijbehorende samenstelling kunt u aflezen in onderstaande grafiek. In deze grafiek wordt onderscheid gemaakt tussen plagioklazen in dieptegesteenten (en metamorfe gesteenten) en vulkanische gesteenten.
- 6 : Is de gevonden uitdovingshoek kleiner dan circa  $20^\circ$  dan kunt u m.b.v. de brekingsindex van de plagioklaas bepalen welk deel van de grafiek u moet aflezen ( $N > N_{\text{kwarts}}$  (of  $N_{\text{cb}}$ ) : rechter deel;  $N < N_{\text{kwarts}}$  (of  $N_{\text{cb}}$ ) : linker deel).

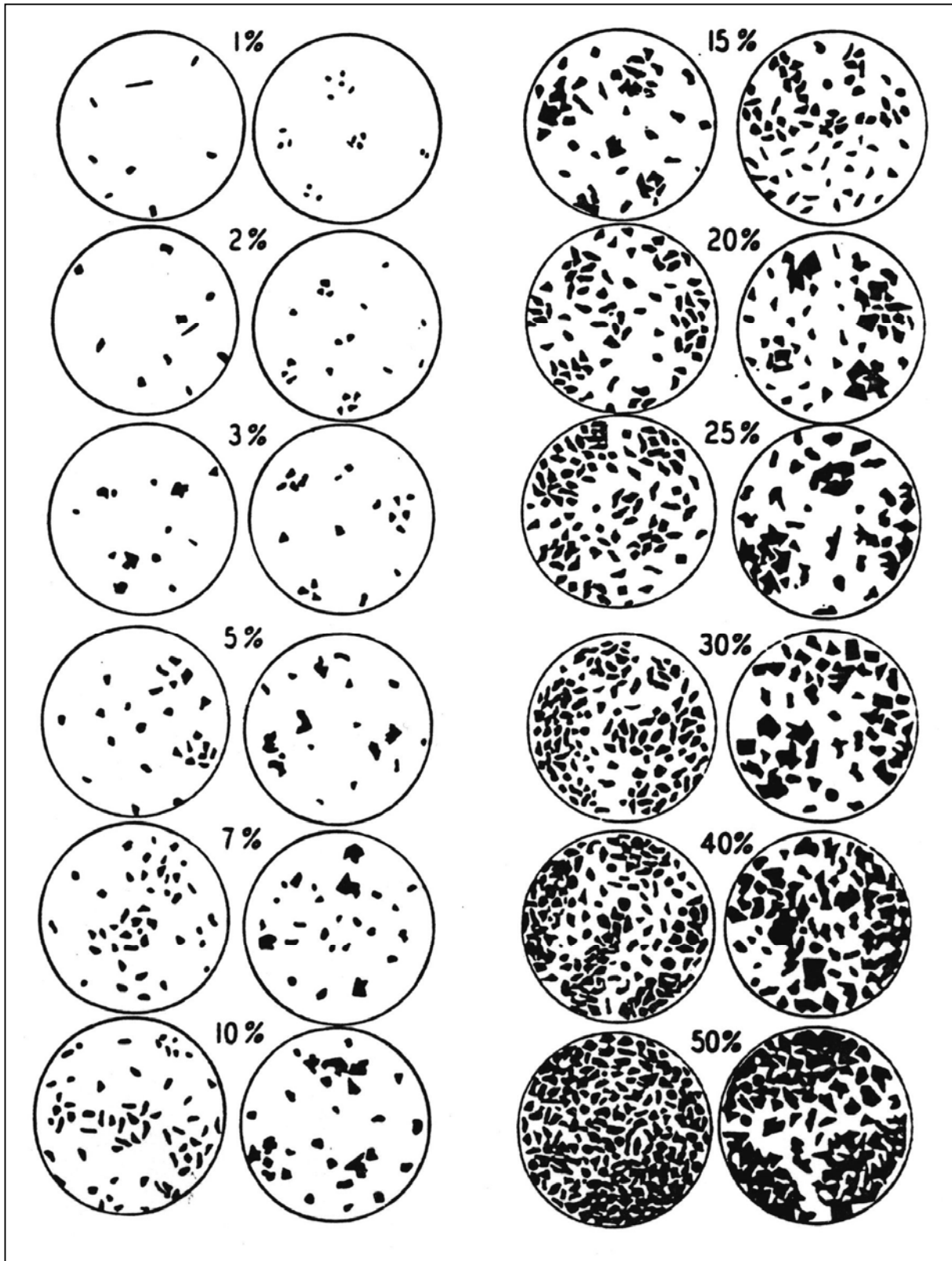




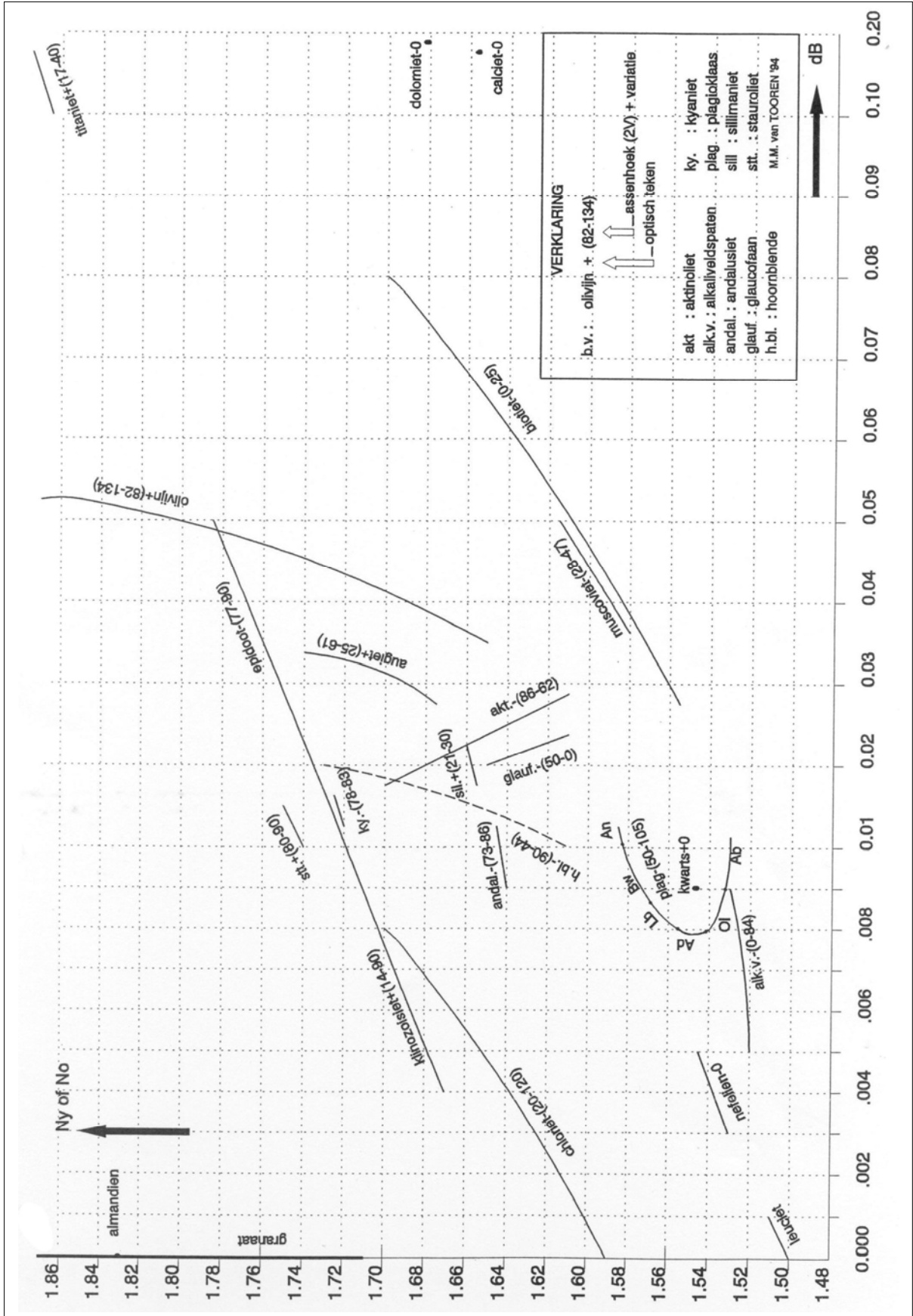
4. Procedure voor de bepaling van de chemische samenstelling van plagioklaas II



5. Hulpfiguren voor het schatten van de mineraalpercentages in een slijpplaatje



6. Grafiek met de brekingsindex n uitgezet tegen de dubbelbreking  $\delta B$





# 7. Kleurenkaart van Michel Lévy

