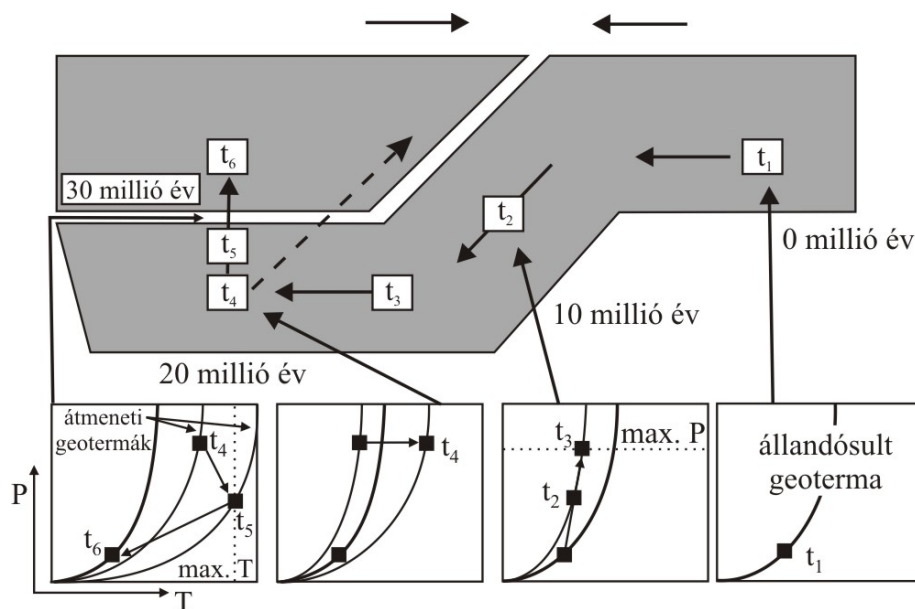


4.1.1. Fizikai körülmények a kéregben, a metamorfózis határai

A litoszférában a mélység növekedésével közel egyenletesen nő a litosztatikus nyomás. Mivel azonban a hőmérsékleti relaxáció a lemezek mozgásánál rendszerint lassabb folyamat, az izotermák számos esetben jelentősen torzult alakúak (v.ö. geotermikus gradiens). Ezért a kéregben és a köpenyben változatos PT viszonyok alakulhatnak ki. A metamorf folyamatok tartományát a diagenezistől folyamatos határ választja el 150 ± 50 °C körül. A felső hőmérsékleti határt az olvadás (száraz, nedves szolidusz) definiálja. Magmás intrúziók környezetében már igen alacsony nyomáson metamorf átalakulás zajlik, míg gyors szubdukció során az alábukó lemez anyagának átalakulása akár 30-40 kbar nyomáson is történhet. A kéreg-köpeny határ kb. 10 kb. litosztatikus nyomással jellemezhető.



4.1.2. Metamorf reakciók

A litoszféra intenzív vertikális és horizontális mozgásai eredményeként a kőzetek a kéregben időről időre megváltozott mélységbe, azaz új PT viszonyok közé kerülhetnek. Kémiai anyaguk ekkor nem az új körülményeknek megfelelő (minimális energiájú) ásvány társaságban van, ezért át kell, hogy alakuljanak. A metamorf reakciók hajtóereje a Gibbs energia minimumra törekvés. Fő típusai a polimorf (pl. andalúzit = szillimanit, kalcit = aragonit) az ioncsere (pl. biotit-gránát Fe-Mg), és a „net-transfer” (pl. albit = jadeit + kvarc) reakciók. A reakciók között külön figyelmet érdemelnek a fluidum tartalmú reakciók (pl. dehidratáció: muszkovit + kvarc = ortoklász + szillimanit + H₂O; dekarbonizáció: dolomit + 2 kvarc = diopszid + 2 CO₂).

4.1.3. A metamorf kőzetek osztályozása

Azt, hogy adott PT viszonyok mellett milyen ásványok, és ezen keresztül milyen metamorfitek keletkezhetnek, lényegében az eredeti kőzet (protolit) kémiai és ásványos összetétele határozza meg. Ezért a metamorf kőzetek osztályozása során elsősorban a protolit összetételét, majd e mellett a P, T hatását kell figyelembe venni. A legfontosabb kémiai (protolit) csoportok a kvarc-földpát kőzetek (savanyú magmatitok, törmelékes üledékek), a metakarbonátok, a metapelitek, a metabázikus kőzetek, az ultrabázikus kőzetek, a mészsilikátok (márgák) és az egyéb, kisebb jelentőségű kőzet típusok. E csoportokon belül növekvő hőmérséklettel nagyon kismértékű, kismértékű, közepes fokú és nagyfokú metamorf kőzeteket különböztetünk meg.

4.1.4. Kvarc-földpát kőzetek (gneisz), karbonátok (márvány) metamorfózisa

A kvarc, és földpát dominanciájú protolit kőzetek közé tartozik a gránit, a riolit és a legtöbb törmelékes üledékes kőzettípus (homokkő). Kémiaileg igen egyszerű rendszerek, a K, Al és a Si a legfontosabb kationok. Mivel ebben a rendszerben széles PT tartományban a kvarc, földpát és a csillámok a stabil ásványok, a fenti kiinduló kőzetek metamorfóziséval keletkező metagránit, metariolit, metahomokkő (kismértékű kőzetek) és gneisz (közepes, nagyfokon) is ezen ásványfázisokat tartalmazza. Magmás protolit esetén ortogneiszről, üledékes protolit esetén paragneiszről beszélünk. Hasonlóan egyszerű kémiai rendszer jellemzi a karbonátos kőzeteket (mészkő, dolomit – Ca, Mg, C), amelyek metamorf megfelelői a kristályos mészkő, ill. dolomit (kismértékű), valamint a márványok (közepes és nagyfokon) szintén kalcit és dolomit ásványokból állnak.

4.1.5. Pelitek (fillit, csillámpala) metamorfózisa – Barrow zonáció

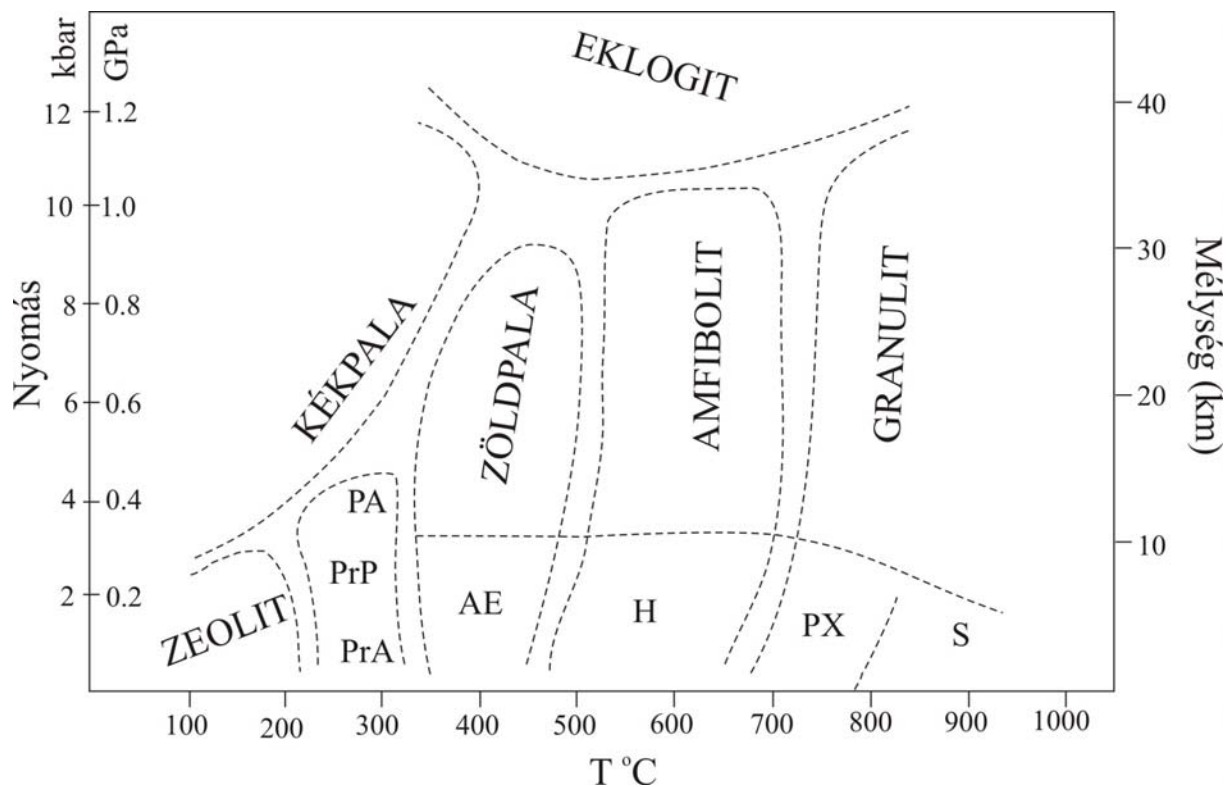
A pelites kőzetek kémiai összetétele (Si, Al, Mg, Fe, K, H) megfelelően komplex ahhoz, hogy eltérő PT viszonyok között (eltérő metamorf fokon) más-más ásványok jellemezzék az e protolitból kialakuló agyagpalát, fillitet (nagyon kismértékű, kismértékű) és csillámpalát (közepes, nagyfokon). Széles PT ablakban fontos összetevők a kvarc, a földpátok és a csillámok (biotit, muszkovit), melyek mellett index ásványok jelzik a metamorf fok növekedését (klorit → biotit → gránát → staurolit → kianit → szillimanit). A metamorf fok növekedését követő ásvány zonációt Barrow ismerte fel. A metapelitekben meghatározók a Fe-Mg ioncserével járó folytonos reakciók is, melynek eredményeként új ásvány nem keletkezik, csak az egyes Fe-Mg fázisok (pl. klorit, biotit, gránát) összetétele változik meg.

4.1.6. Metabázitok

Az andezit (diorit), bazalt (gabbró) metamorfózisával keletkezett kőzetek összetételére a Fe, Mg, Ca szilikátok dominanciája jellemző. Mivel az eredeti magmás kőzetek H₂O-t lényegében nem tartalmaznak, és nagyon magas hőmérsékleten keletkeztek, alacsony hőmérsékletű metamorfózis során ásványai instabillá válnak, és OH-tartalmú fázisokká (zeolitok, prehnit, pumpellyit, epidot, klorit, aktinolit) alakulnak át (metabazalt, zöldpala). További hőmérséklet emelkedés hatására fokozatos dehidratáció eredményeként alakul ki az amfibol, plagioklász (gránát) tartalmú amfibolit. Magas nyomáson a plagioklász földpátok hiánya és az alkáli amfibolok (kékpala), illetve gránát és omfacit megjelenése (eklogit) jellemző.

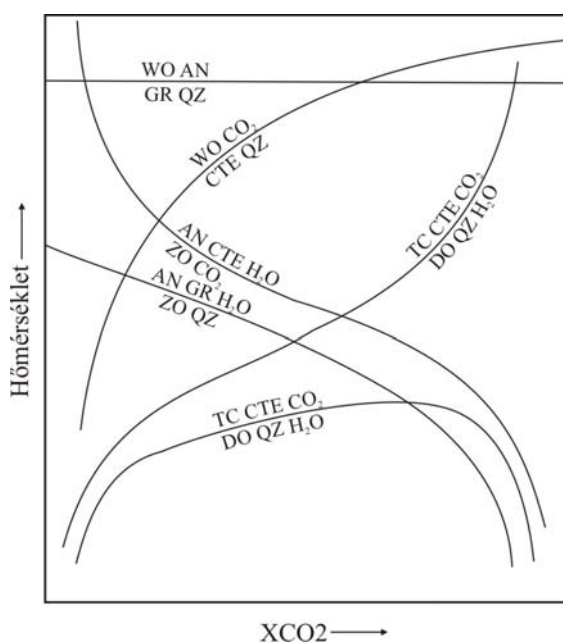
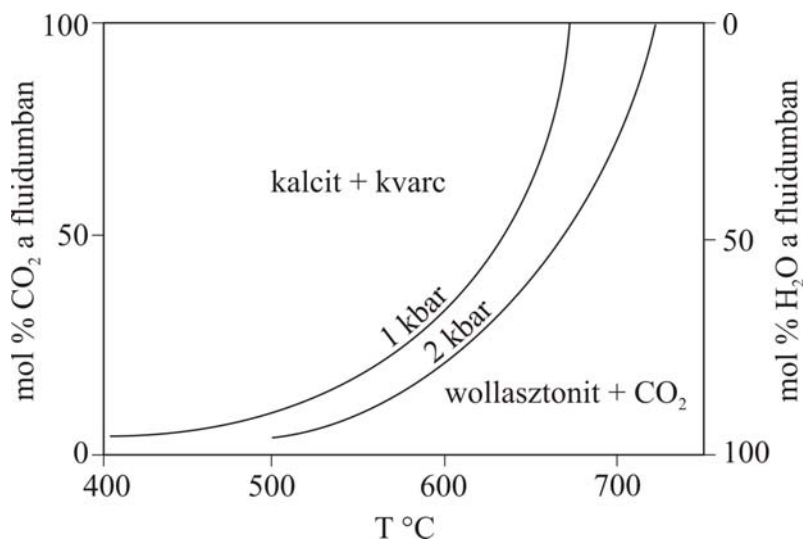
4.1.7. Eskola-féle fácies rendszer

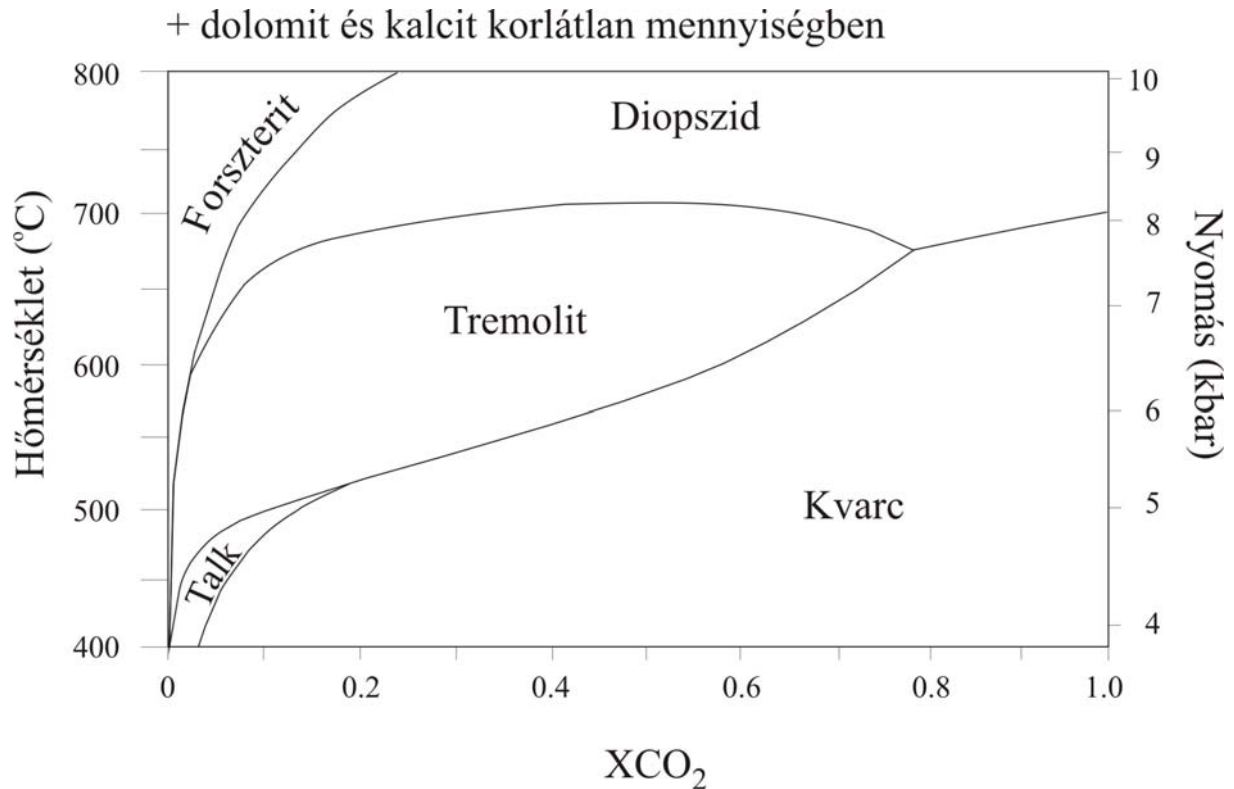
A metabázikus kőzetek stabil ásványparagenezisein alapuló osztályozási rendszer. Alapja a fácies (arcuat), amely azonos kémiai összetétel (bazalt) esetén kialakuló azonos ásványi összetételt jelent. Az egymást követő fáciesek eltérő PT viszonyokat jeleznek meglehetősen széles PT ablakban.



4.1.8. Mészszilikátok metamorfózisa

A karbonát és sziliciklasztos üledékek keveredésével kialakult márgák metamorf megfelelői a mészszilikátok. Rendkívül bonyolult kémiai összetételüket (Si, Al, Fe, Mg, K, Ca, H, C) tovább bonyolítja, hogy a protolitot rendszerint H_2O és CO_2 tartalmú ásványok (pl. kaolinit, kalcit) alkotják. Ezért a márgák metamorfózisa komplex fluidum tartalmú reakciók sorozatán keresztül zajlik, amit – a megszokott PT változók helyett – rendszerint a $T\text{-}X_{\text{CO}_2}$ térben vizsgálunk. A legegyszerűbb kvarc – kalcit – dolomit rendszer metamorfózisa eredményeként tremolit és diopszid (esetleg forsterit) tartalmú márvány alakul ki. Valódi márgák esetében a megfelelő metamorf kőzetet Ca-Al-szilikátok uradják.





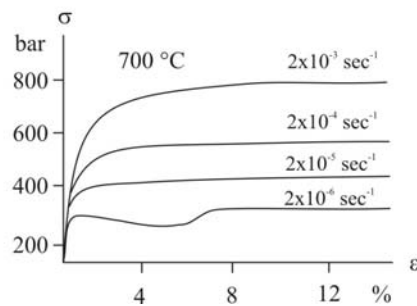
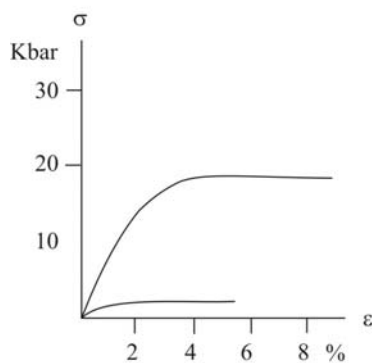
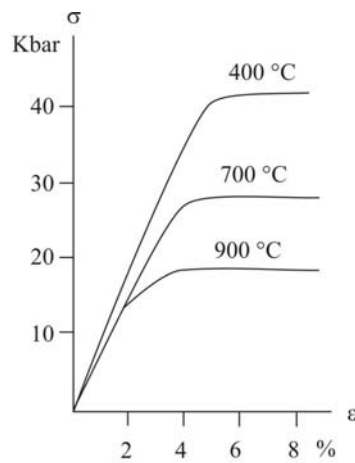
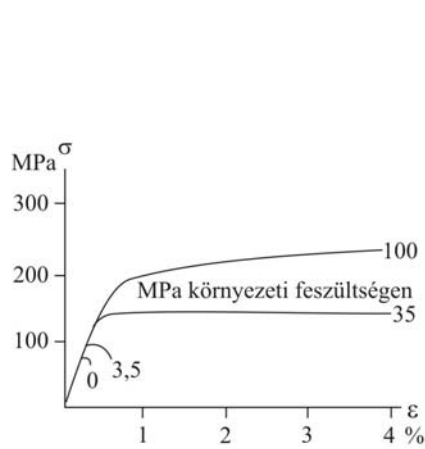
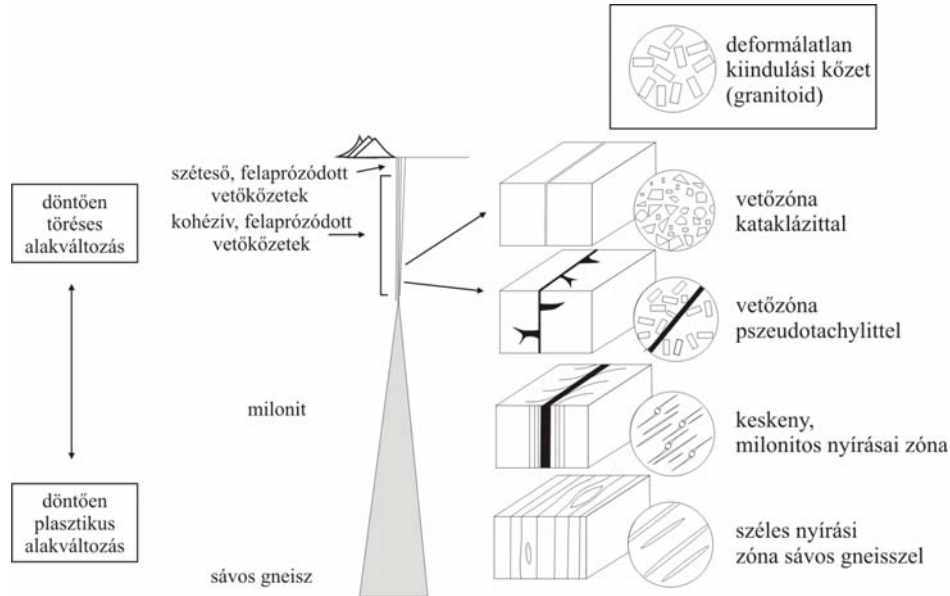
4.2.1. Migmatit, anatexis

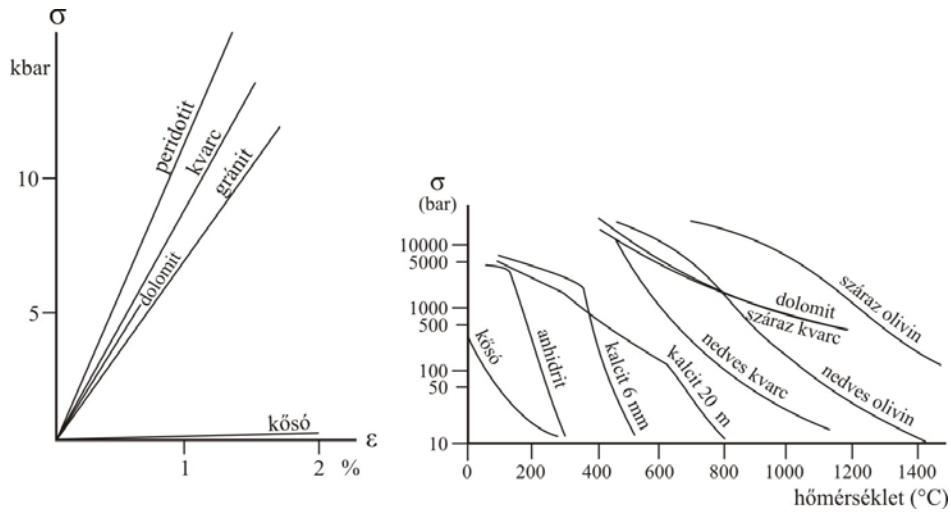
Megfelelően magas hőmérsékleten a kőzetek elérik az adott rendszerre jellemző szoliduszt, és parciálisan olvadni kezdenek (v.ö. magmás kőzetan!). Legjellemzőbb folyamat a muszkovitnak a csillámpalák és gneiszek esetében végbemenő dehidratációja, amely H_2O -telített rendszerben eutektikushoz közeli összetételű gránit olvadékot eredményez. A kis-mennyiségű olvadék rendszerint nem tudja elhagyni a kiinduló kőzetet, így jellegzetes kevert kőzet, migmatit keletkezik. Fő részei az olvadékból kristályosodott, főleg világos alkotókból álló leukoszom, és a meg nem olvadó ásványokat tartalmazó melanoszom.

4.2.2. Tektonikus metamorfózis, deformáció

A P és T (valamint a pH és Eh) mellett a kőzettani folyamatok meghatározó fizikai tényezője az irányított nyomás, vagy stressz. Legfontosabb kiváltó oka a kőzetlemezek szakadatlan horizontális és vertikális mozgása, és mind jellegében, mind hatásában alapvetően eltér a nyomástól (P). Irányított (anizotróp) nyomástérben lévő anyag a stresszre deformációval válaszol, amely lehet rugalmas, képlékeny (plasztikus), vagy töréses (ruptuális). A deformáció jellege függ a stressz mértékén túl az anyagi minőségtől, a hőmérséklettől, a nyomástól, a fluidum tartalomtól és az irányított erőter fennmaradásának időtartamától is. (Agyagos kőzetek, evaporitok felszín közelében is képlékenyen viselkednek, míg pl. a gránit nem). A hőmérséklet növekedése, csakúgy, mint a fluidum tartalom a plasztikus deformációnak kedvez, ezért

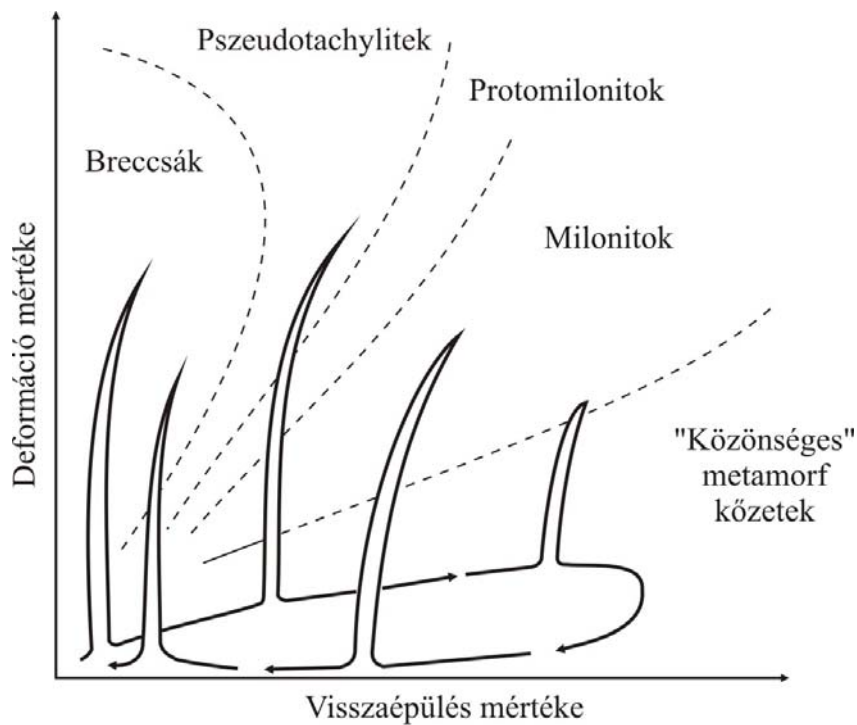
nagy mélységben a legtöbb kőzet képlékenyen reagál az irányított nyomásra. Töréses forma-
elemek (törések, vetők) ennek megfelelően felszín közelben, míg gyűrődések a litoszféra mé-
lyebb zónáiban alakulnak ki.





4.2.3. Tektonitok

Tektonikus övezetekben a mélység függvényében deformált kőzetek, tektonitok jönnek létre. A mélység felé haladva a jellemző kőzet típusok a vetőbreccsa, a kataklázit és a milonit. Utóbbi igen jól irányított, plasztikusan deformált kőzet. Szintén képlékeny deformációs válasz eredménye a számos metamorf kőzetre jellemző paláság kialakulása.



4.2.4. Metamorf kőzetek szerkezete, szövete

A metamorf kőzetekben a nyomás és hőmérséklet-változás hatására kialakuló új ásványok geometria viszonyait elsősorban a tektonikai környezet által determinált irányított nyomási tér szabályozza. A metamorf kőzeteket ezért a jellemző ásványi összetétel mellett jellegzetes, rendszerint irányított szerkezet és szövet is jellemzi. Megnyúlt habitusú, egy irányba rendeződött ásványok (pl. amfibolok) határozzák meg a kőzet lineációját, míg a foliációt a táblás, lemezes megjelenésű szemcsék (pl. csillámok) definiálják. A jelentős csillámtartalmú csillámpala palás, míg – az alacsony csillámtartalom miatt – gyengén foliált gneisz gneisz szerkezetű. A nem teljes mértékű rekrisztallizáció miatt a metamorf kőzetekben rendszerint együtt találhatjuk az egymást követő deformációs fázisokra jellemző ásvány együtteseket, melyeket pre-, szin-, és poszt-kinematikus jelzővel illetünk.

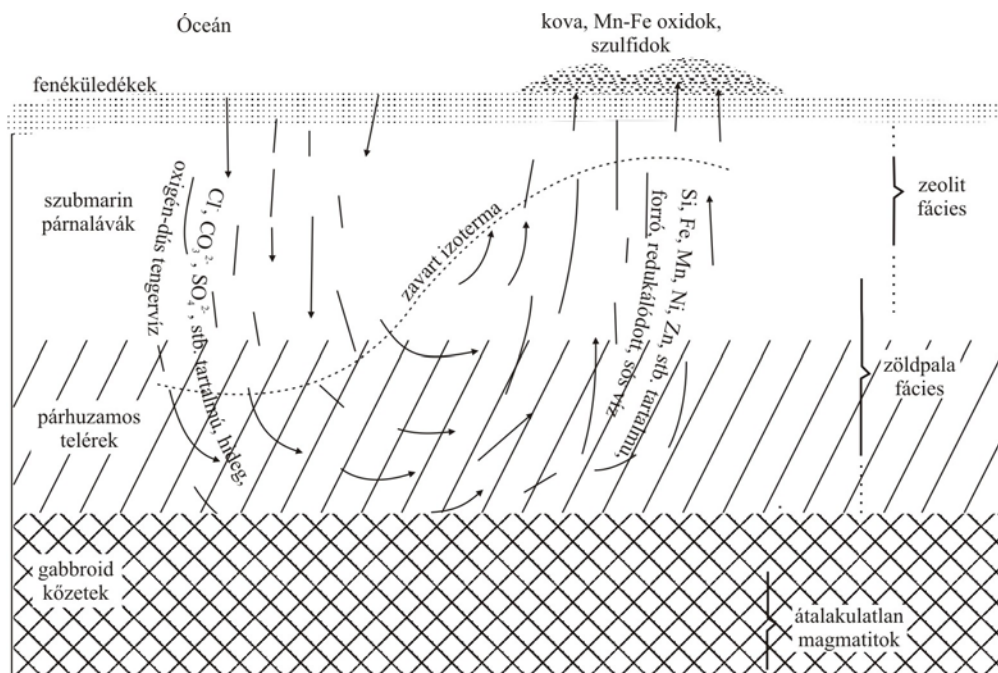
4.3.1. Regionális metamorfózis

Annak függvényében, hogy a metamorf átalakulást okozó PT viszonyok a litoszféra mekkora részén hatnak, megkülönböztetünk regionális és lokális metamorf folyamatokat. A nagy területen ható regionális metamorf folyamatok alaptípusai az orogén-, az óceánaljzati- és a betemetődéses metamorfózis. Szűk értelemben regionális metamorfózisnak az orogén metamorf átalakulásokat értjük, melyeket hosszú ideig fennálló dinamikus környezet, több egymást követő deformációs fázis, 150-1100 °C hőmérséklet, 2-30 kbar nyomás és 5-60 °C/km hőmérsékleti gradiens jellemez. A regionális metamorf kőzeteket rendszerint irányított szövet jellemzi.

4.3.2. Betemetődéses és óceánaljzati metamorfózis

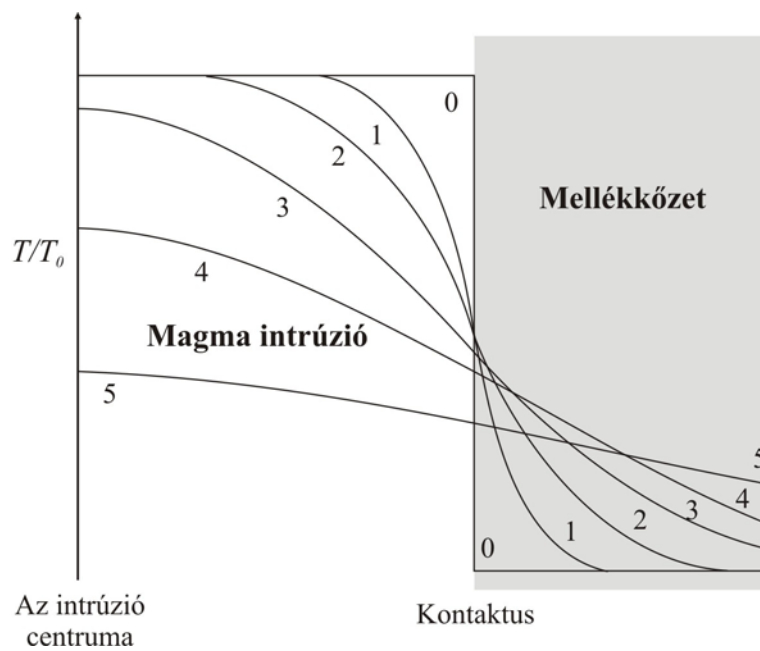
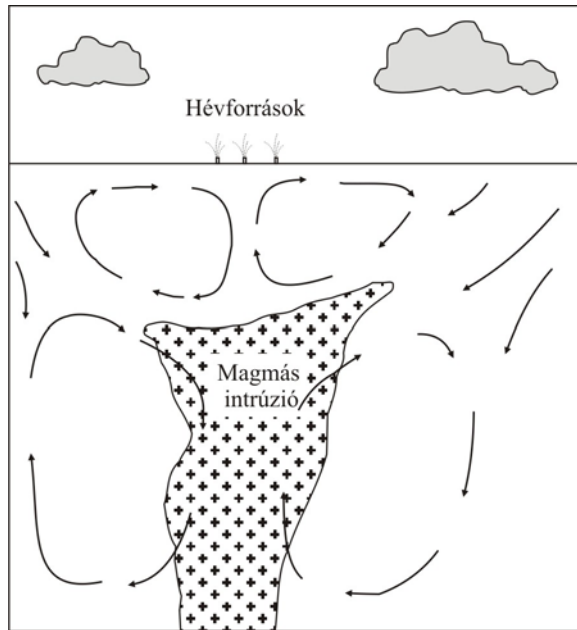
Süllyedő medencék üledékei és vulkáni kőzetei a diagenezist követően fokozatosan metamorf viszonyok közé kerülnek. A mélység miatt megemelkedett PT következtében a kémiai rendszernek megfelelő metamorf ásványok rendszerint megjelennek, de az izotróp nyomási térben irányított szövet (pl. paláság) nem alakul ki, a kőzetek eredeti szövete, szerkezete meg tud őrződni. Az óceáni lemezt alkotó bázikus és ultrabázikus kőzetek az óceánközépi hátság tágabb környezetében a megemelkedett hőmérsékleti gradiens (50-500 °C/km) miatt közepes hőmérsékleten (< 500 °C) és alacsony nyomáson (< 3 kbar) átalakulnak. A keletkezett metamorfitek az izotróp nyomási térnek megfelelően nem irányított szövetűek. Az óceánaljzati metamorfózis lényeges eleme a kőzet és a konvektív áramlással mélybe jutó tengervíz közötti cserereakció is, aminek következtében a kőzet kémiai összetétele megváltozik (nyílt

rendszer), ásványai hidratálódnak. Az eredeti magmás kőzetekből metabazalt, szerpentinít képződik.



4.3.3. Kontakt metamorfózis, metasomatózis

Sekély mélységű magmás intrúziók környezetében a lokálisan megemelkedett hőmérséklet hatására a mellékkőzet metamorf átalakulást szenvedhet. A kialakuló kontakt udvar mérete néhány métertől 1-2 km-ig terjed, s a mellékkőzet anyaga mellett függ a mélységtől, a magmás test méretétől, anyagától, a fluidum mennyiségétől is. A térben és időben folyamatosan lecsengő hőhatás horizontálisan akár 100 °C/km gradienst is elérhet. Különösen jellemző agyagkőzetek és karbonát kőzetek kontakt átalakulása, mely szaruszirt, illetve szkarn kőzetek képződésével jár, melyek jellegzetesen aprószemcsés, nem palás képződmények. A kontakt metamorf folyamatokat a posztmágmás fluidumok pneumatolitos és hidrotermális metasomatikus hatása bonyolítja (lásd ott).



4.4.1. Magyarország metamorf képződményei I.

Magyarországon felszínen meglehetősen kevés metamorf képződményt ismerünk. A Balaton-felvidéken kiscokú agyapala, fillit és metavulkanit változatok találhatóak. A Soproni-hegységben, valamint a Kőszegi-hegységben gneisz, csillámpala és amfibolit fordul elő. Az

Északi-középhegységben számos helyen kis-, és közepes fokú metamorf képződmények találhatóak (pl. K-Bükk, metaandezit; Szendrői-hegység, kristályos mészkő).

4.4.2. Magyarország metamorf képződményei II.

Az Alföld fiatal üledékes medencéjének aljzatát Variszkuszi korú polimetamorf kőzetek alkotják. A medence harmadidőszaki süllyedése nyomán kialakult tagolt aljzat morfológia ugyanakkor nem teszi lehetővé, hogy az eltemetett metamorfítokat – akár mélyfúrásokkal – mindenütt megismerjük, azokról csak pontszerű információnk van. A leggyakoribb kőzetek az Alföld aljzatában a különböző közepes fokú gneisz típusok és az amfibolitok, a csillámpala szerepe alárendelt. Több helyről (pl. Szarvas, Dorozsma, Jánoshalma) ismerünk eklogitot is.

A Dél-Dunántúlon mindezek mellett jelentős márvány testek (Görcsönyi hátság) és szerpentinit (Gyód, Helesfa) is található.