

GEOMETRISK ANALYSE AF ET POLYFASE- FOLDET GRUNDFJELDSKOMPLEKS

JON S. PETERSEN

PETERSEN, J. S.: Geometrisk analyse af et polyfaseholdet grundfjeldskompleks. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1973*, side 71–81. København, 14. januar 1974.

The structural pattern of a folded high-metamorphic shield area near Lyngdal, South Norway, is presented. Several macroscopic fold episodes have been involved. On the basis of geometrical analysis a kinematic development is suggested, including both homogeneous and heterogeneous deformation.

Jon S. Petersen, Geologisk Institut, Aarhus Universitet, Universitetsparken, DK-8000 Århus C.

Det kortlagte område er et højmetamorfte grundfjeldskompleks, som tilhører den prækambriske Telemark-Agder-Rogaland provins i Sydnorge. Området er beliggende ca. 50 km NNØ for Norges sydligste punkt, Lindesnæs.

De dominerende bjergarter er konforme granitiske gnejser, synkinematiske porfyritiske graniter, samt konforme, båndede, amfibolitiske bjergarter, der tjener som værdifulde ledehorisonter. Det specielle forhold, at højmetamorfe felsiske bjergarter ofte indeholder relativt få strukturelementer, gør, at statistisk behandling af de indsamlede data er nødvendig for en undersøgelse af et områdes geometriske relationer.

Det er en almindelig iagttagelse, at kumulativ statistisk behandling af strukturelle elementer over større områder i migmatitkomplekser ofte kun giver indirekte resultater, mens en rent geometrisk behandling af data i strukturelt afgrænsede områder (subområder) ofte giver velegnede analyseelementer (f. eks. Berthelsen et al. 1961, Turner & Weiss 1963). Det er under en sådan analyse væsentligt at skelne mellem strengt geometriske observationer, og observationer der knytter kinematiske begivenheder sammen.

Strukturelt domineres det aktuelle kortbillede af NNV-strygende aksialfladespor. Disse er trukket gennem punkter med størst kurvatur. Stort set er de parallelle, og den rumlige orientering af aksialplanerne kan konstrueres på grundlag af planarstrukturernes (foliationen) orientering langs aksialfladesporene.

Når man betragter superposeret foldning, er det vist, at nye folder akse-retninger er fuldstændig afhængige af orienteringen af det s-plan, i hvilket

de dannes (Weiss 1959), og kun undtagelsesvis dannes folder med konstant retning og dyk. Det er vist for disse to kinematiske modeller, som danner koncentriske og similar folder, og det er normalt accepteret, at modellerne svarer nært til deformationer, man finder i for eksempel grundfjeldsbjergarter (Ramsay 1962, Hudleston 1972).

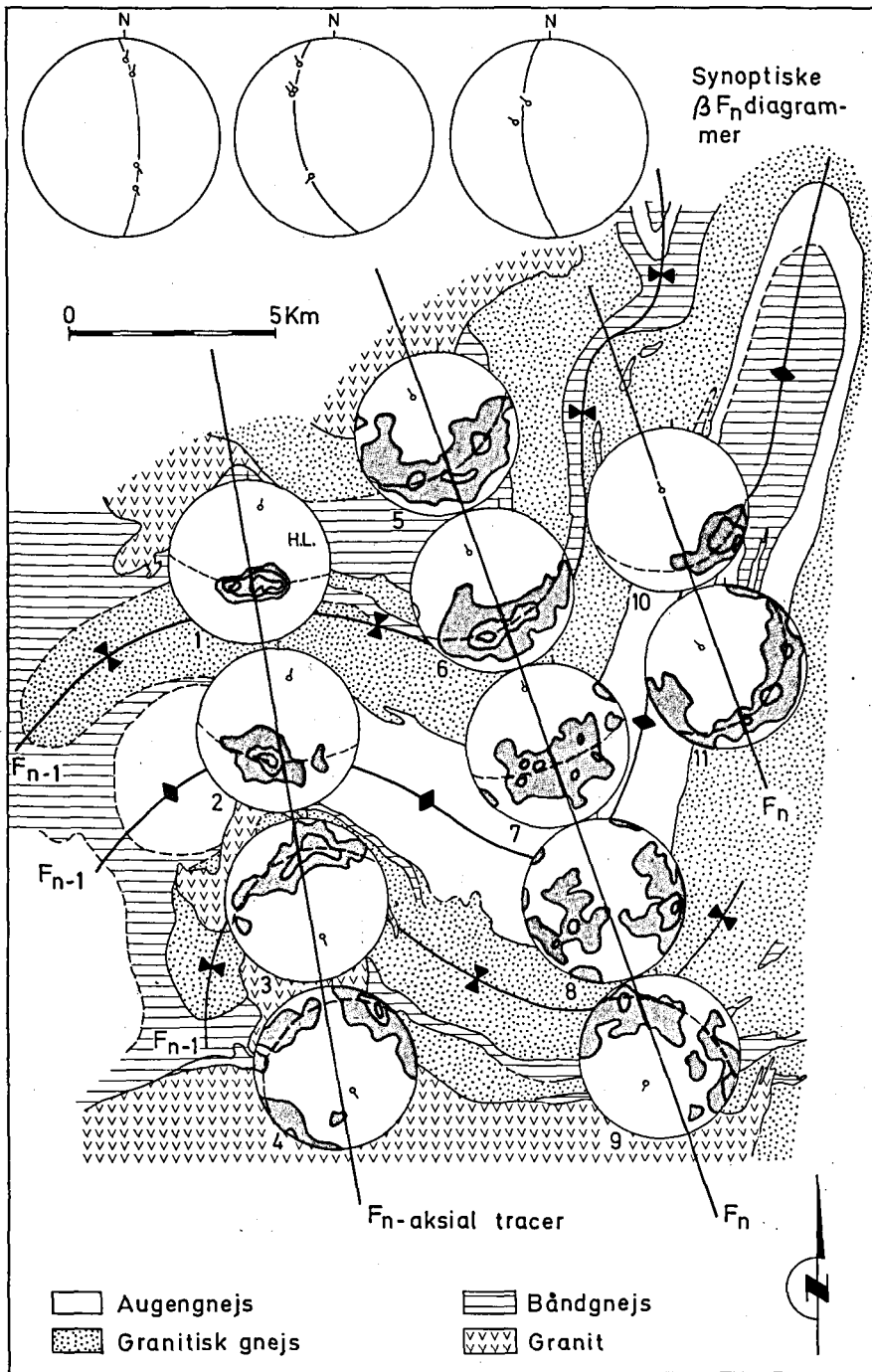
På fig. 1, som er et simplificeret geologisk kort over det karterede område, er i den nordvestligste del medtaget kortlægning, foretaget af H. Lien (1969), og i den nordligste del af I. H. Thomsen (1972). Endvidere har R. P. Petersen og B. M. Jakobsen venligst stillet materiale til rådighed fra den nordøstligste del af den centrale augengnejs. Disse supplementer er især medtaget for at angive den centrale augengnejs som et meget stort interferensmønster, type 2 (Ramsay 1967).

Planare elementer

Ser man på det vestligste aksialfladespor, kan det underdelés i fire subområder, hvor s-plansmålinger definerer foldeakser, som alle tilnærmelsesvis er beliggende i samme plan, og hvis horisontale retning er den samme, som kan måles på kortet, det vil sige strygning NNV, og hældning stejlt mod øst ($356^{\circ}/76^{\circ}$). Det næste spor kan inddelès i fem subområder, hvor foliationen angiver fire foldeakser, som også synes at ligge i samme plan strygende NNV, og stejl hældning mod vest ($246^{\circ}/60^{\circ}$). Det ses, at aksialfladesporet på kortet har et let kurvet forløb; men det har tilnærmelsesvis samme retning, som det synoptiske diagram angiver. I realiteten er aksialplanet i de nordlige subområder næsten vertikalt, mens hældningen er ca. 60° i den sydlige del. Det bemærkes, at i området hvor akserne skifter fra nord, til syddykkende, er foliationsmålingerne tilsyneladende præget af stor strukturel heterogenitet, idet øst-vest-strygende foldeakser synes at overpræge den NNV-SSØ-strygende retning. Jeg skal imidlertid senere vende tilbage til dette diagram med en sandsynlig forklaring på forholdet. Det østligste spor er kun inddelt i to subområder, et sydligt, hvor foliationen klart definerer en foldeakse, og et nordligere område, som er præget af stor strukturel homogenitet, uden tydelig foldning af planar-strukturerne. Men som senere skal ses, foldes tidligere lineationer netop i dette område.

Denne sidste foldning (F_n) refolder et system af ældre folder, hvis natur kun kan betragtes i områder, som er homogene domæner i forhold til sidste deformation (Turner & Weiss 1963), det vil sige flankerne af F_n folderne. Selv om orienteringen af disse – de indbyrdes retninger – er forstyrrende,

Fig. 1. Simplificeret geologisk kort med konturerede π -diagrammer fra subområder langs F_n aksialfladespor. Endvidere er angivet aksialfladespor (trace'r) for F_{n-1} folder. Kontureringsintervallet er 2,5–5–10%.



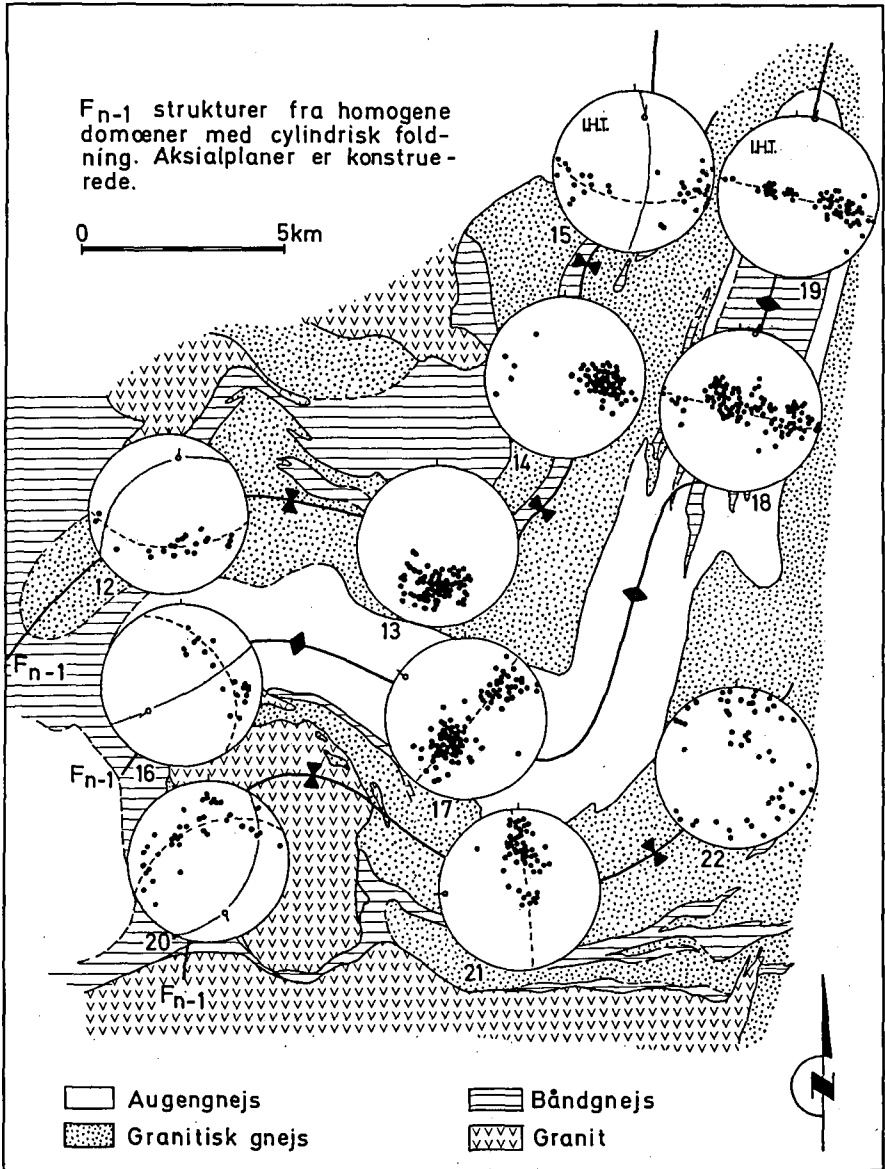


Fig. 2. π -diagrammer af foliationsmålinger fra subområder i homogene domæner for F_n foldningen, det vil sige geometriske relationer af makroskopiske F_{n-1} folder.

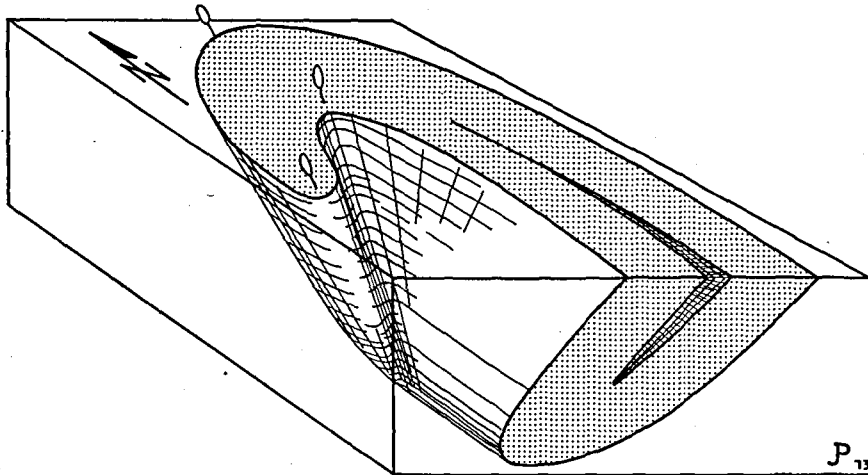


Fig. 3. Reorientering af den sydlige synform til antifform på grund af refoldning. (subområderne 3, 4 og 20).

er det muligt i passende subområder at få indtryk af disse folders geometri.

I det kortlagte område udgør F_{n-1} folderne et system af to synforme, og en mellemliggende antifform. Denne antifform er markeret ved tilsynekomsten af den centrale augengnejs.

I fig. 2 ses π -diagrammer af foliationsmålinger i passende subområder. Den nordlige synform er inddelt i tre subområder, hvor det vestligste er selve ombøjningszonen (12). Dette plot er baseret på rekognoscering i området vest for det kortlagte. Foldeaksen er dykkende mod NNØ, og aksialplanet, som er konstrueret, hælder 40° ($58^\circ/40^\circ$). Subområde 13 og 14 er ret homogene, men det bemærkes, at diagrammerne viser en spredning på over 90° vinkelret på aksialplansretningen, hvilket muligvis indikerer, at F_{n-1} folden er isoklinal i dette område. I område 15 er folden igen åben.

Den centrale antifform er inddelt i subområderne 16, 17, 18 og 19, og kan generelt klassificeres som en stående horisontal fold (Upright-horizontal, Fleuty 1964). I den vestligste del dykker folden mod sydvest ($228^\circ/45^\circ$), og aksialplanet afviger kun lidt fra vertikal. Subområde 17 viser folden som en horisontal åben fold med en dihedral vinkel på ca. 70° , målt som afstanden mellem de to maksima i π -diagrammet (Dahlström 1954, Fleuty 1964).

Audnedalsantiformen (områderne 18 og 19) er karakteriseret ved horisontal akse, men det er ikke her muligt at iagttage vinklen mellem flankerne, idet målingerne synes spredt over hele storcirkelbuen.

Den sydlige synform intruderes af en delvis diskordant granit, men da dens intrusion synes delvis uafhængig af de regionale strukturer, vil jeg

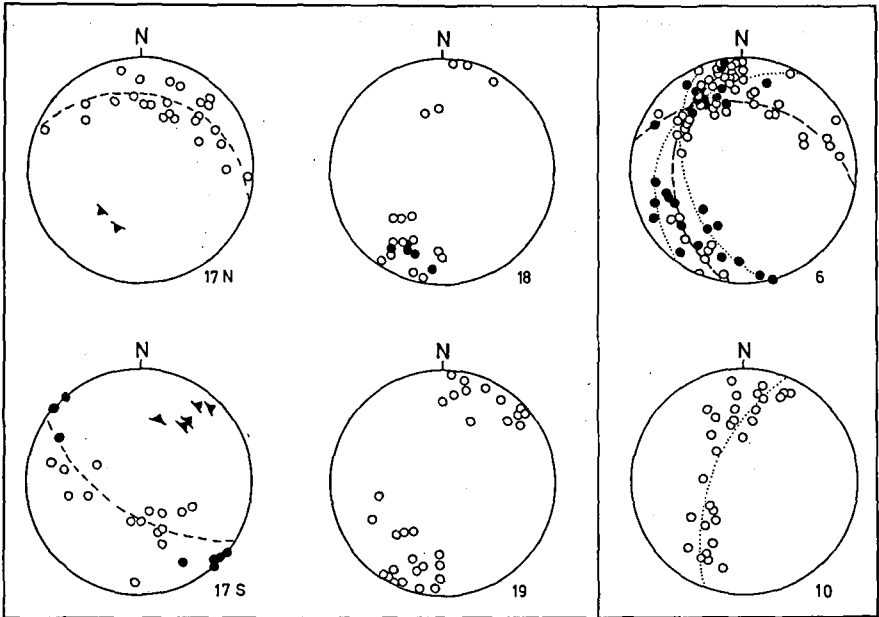


Fig. 4. Lineationer fra subområderne 17, 18, 19, 6 og 10. Åben cirkel er minerallineationer, udfyldt cirkel er meoskopiske foldeakser og trekanter er aksialplanspoler.

i det følgende se bort fra dens eventuelle påvirkning. De fleste grænser er skarpt diskordante, og der er ikke observeret tegn på større deformation af det regionale mønster på grund af intrusionen.

Subområde 20, som er selve ombøjningszonen, er på kortbilledet reelt en sydøstdykkende antiformal i ombøjningszonen. Det skyldes formentlig, at synformen på grund af refooldningen af F_n er blevet reorienteret til en hældende, liggende fold (antiform, reclined fold, Fleuty 1964). I fig. 3 ses dette forhold illustreret, og beliggenheden af subområderne 3, 4 og 20 er angivet.

I område 21 er synformen formentlig isoklinal, idet målingerne også her spreder 90° på tværs af aksialretningen, og antyder en subhorizontal akse-retning. I det østligste område (22) er målingerne meget spredte, selv om en sydvestdykkende antiform synes antydnet. Denne spredning er formentlig sammenhængende med det faktum, at den sydforliggende farsundit intrusion netop i dette område har intruderet langs en nord-sydgående shearzone, som har haft indflydelse på de omkringliggende bjergarters regionale foliation.

Lineare elementer

Den sidste deformation synes intetsteds at have dannet minerallineationer, og de eneste lineare F_n elementer er derfor mesoskopiske folder, defor-

merede F_{n-1} elementer, eller parasitiske folder, der viser vergens mod makroskopiske F_n folder og derigennem angiver deres strukturelle position. I fig. 4 er angivet lineare elementer i forskellige strukturelle positioner. Beliggenheden af subområderne er de samme som angivet på figur 1 og 2. Subområderne 17N, 17S, 18 og 19 er områder som er homogene med hensyn til F_n og altså kun deformeret af F_{n-1} , hvorimod subområderne 6 og 10 ligger på aksialfladesporet for F_n foldningen og derfor også er deformeret af denne. Subområderne 17N og 17S er endvidere homogene domæner for F_{n-1} foldningen, idet de er beliggende på hver sin flanke af antiformen (F_{n-1}).

Betragtes lineationer i to ekstreme områder, et vestligt og et nordligt, iagttages en karakteristisk forskel i orienteringen. Der synes at være en progressiv ændring langs strukturerne. I det vestligste område er minerallineationer ensartet spredt på en storcirkel, der svarer til den planarstruktur, som i den centrale augengnejs definerer F_{n-1} folden. Mesoskopiske folders aksialplaner er også parallelle med denne planarstruktur. At disse lineationer er homogent fordelt på en storcirkel, viser tilstedeværelsen af tidligere folder og minerallineationer, som er passivt deformeret af F_{n-1} folden. Enkelte af disse F_{n-2} folder er udviklet makroskopisk, f. eks. i den sydlige del af området, hvor flere isoklinale folder, beliggende på den sydlige flanke af F_{n-1} folden ses. Aksialplanerne og foldeakserne for disse folder er beliggende i det samme plan, indeholdende de øvrige deformede folder. Men da disse folder optræder i leukokratiske gnejs er struktur elementer ofte begrænset til foliationer, hvorfor relationer til ældre folder er vanskelige at iagttage. Imidlertid ses flere mesoskopiske F_{n-2} folder lokalt at deformere ældre lineationer og tidligere isoklinale folder, hvorfor en generel fase indeholdende alle ældre foldestrukturer: F_{n-3} synes rimelig at etablere.

Hvis et plan indeholdende alle retninger af lineationer foldes, vil resultatbilledet være som et β -diagram (Ramsay 1964) med skæringspunkt i den nye foldeakse. I subområde 6 er a-b planet (Ramsey 1960) fra område 17N refoldet af F_n fasen og i diagrammet er to planer svarende til flankerne indtegnet. Andre orienteringer af planer i folden er angivet, til forklaring af spredningen på målingerne.

I den nordlige del (område 18 og 19) er der imidlertid langt større grad af homogenitet, idet minerallineationer og mesoskopiske folder tilnærmelsesvis er parallelle, og parallelle med F_{n-1} folden. At disse lineationer er F_{n-1} lineationer, og at tidligere lineationer og folder er destruerede, er en mulighed. Imidlertid synes der at være jævn overgang mellem subområderne 17N-17S og 18-19 således forstået, at denne ændring i spredning er kontinuerlig langs F_{n-1} strukturerne. En anden forklaring på det forhold kan være en vis grad af homogen deformation, men det vil her føre for vidt at belyse dette yderligere. Det skal blot nævnes, at for eksempel deformede mega-

krysters form er ret forskellig i de to områder, og samtidig ses vinklen mellem de to interfererende aksialfladespor F_n og F_{n-1} at være mindre i den østlige del af området.

Fastholdes imidlertid den kendsgerning, at lineationerne i den nordlige del udviser tilnærmelsesvis parallel orientering med F_{n-1} , er det interessant at se, hvorledes disse lineationer reorienteres i området, som skæres af F_n aksialfladesporet. Subområde 10 er fra båndet gnejs og augengnejs netop i denne region. Ramsay (1960) har vist, at geometrien af oprindelig retliniede strukturer under senere deformation reorienteres således, at lineationer i en planar struktur efter deformation af similar type vil plotte på en storcirkel i en stereografisk projektion.

Skæringen mellem det plan, som indeholder de reorienterede lineære strukturer og a-b planet (aksialplanet) for F_n , folden, svarer til den kinematiske a-retning for F_n deformationen (Ramsay 1960), som efter de citerede data kan bestemmes til $310^\circ/56^\circ$, angivet på fig. 5A.

Kinematik.

Selv om den kinematiske a-retning ('flyderetningen') er bestemt, er den relative bevægelsesretning langs den ikke givet. I dette tilfælde kommer geometrien af folderne i subområde 10 imidlertid til hjælp. Hældningen af den vestlige flanke af Audnedalsantiformen (F_{n-1}) er ca. 50° - 60° , og da den kinematiske a-retning netop har dette dyk, vil laget kun foldes ubetydeligt, hvorimod lineationer i bevægelsesplanet foldes. På kortet ses dette at kunne bekræftes. Den østlige flanke er næsten vinkelret på kinematisk a, hvorfor dette lag vil foldes, og betragtes her geometrien af den dannede fold, kan det ses, at den østlige flanke af Audnedalsantiformen er bevæget relativt mod vest. Det betyder at den kinematiske a-retning kan retningsbestemmes som fig. 5A angiver.

Da aksialplans-sporene for de øvrige F_n folder er tilnærmelsesvis parallelle og retliniede, kan F_n deformationen antages at være en inhomogen, plan transformation (Turner & Weiss, 1963). Man kan på grundlag heraf antyde retningen af kinematisk a langs de to andre spor, idet de relative bevægelser må være modsat rettede, hvis man betragter foldningen af F_n som et dynamisk system. Det må understreges, at det foreliggende kun er en model, som dog tilsyneladende bekræfter alle feltobservationer. Fig. 5B viser et idealiseret diagram over den centrale augengnejs med skematiske aksialplaner indlagt, og fig. 5C og D viser, hvorledes henholdsvis horisontal- og vertikalkomponenten af den kinematiske bevægelsesretning resulterer i forskelligt rettede »passive« folder, fordi den centrale augengnejs før deformationen var en åben fold med forskellig orientering af flankerne.

I udsnittet på fig. 5D er antydnet den centrale båndgnejsenhed, og det

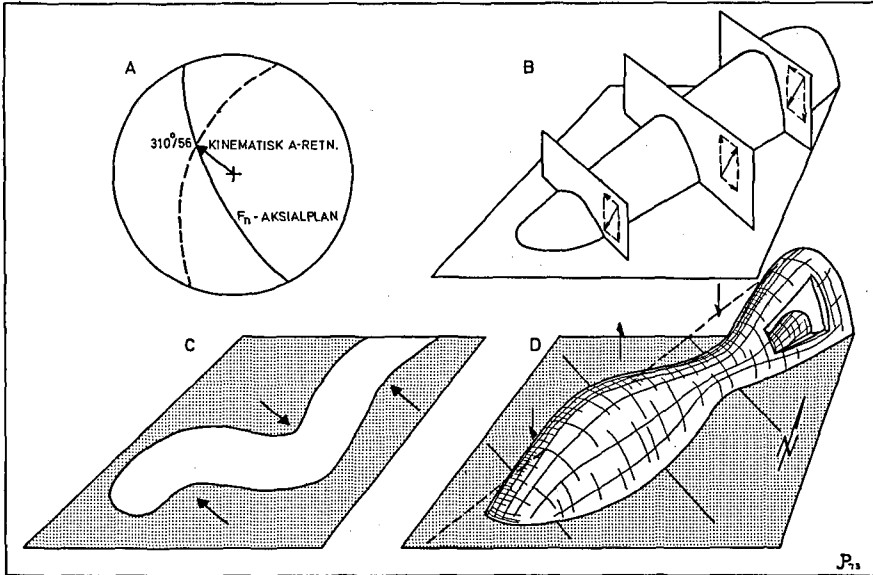


Fig. 5. Orienteringen af kinematisk a-retning og dennes indflydelse på geometrien af den tidligere centrale antiform i horisontal- og vertikalretning.

regionale dyk antiformen er anført med, medfører at denne båndgnejs ikke blottes igen i den centrale del af området, som vertikal komponenten af F_n folden antyder. Dette område svarer i øvrigt til subområde 8 på figur 1, hvor subområdet er så stort, at det omfatter både den nordøstlige dykkende del, samtidigt med den sydvestdykkende del af den dannede domestruktur, og viser, at dette tilsyneladende heterogene område har sin forklaring i subområdets for omfattende størrelse. Det regionale dyk er muligvis sammenhængende med den sidste geometriske betragtning: Der findes en tilsyneladende konflikt i det vestlige område (se her fig. 2), idet den centrale augengnejs er foldet med en sydvestdykkende akse (antiform), mens de symmetriske synforme dykker svagt mod nordøst (subområde 20, dog først efter »udretning« af F_n folden, sml. fig. 3), det vil sige der er næsten 50° mellem de to retninger af det samme koblede system, mens de samme folder i den nordlige del er parallelle; en observation som umiddelbart kun kan forklares af en konisk foldning (Ramsay 1967). Imidlertid fås samme billede ved en foldning af en vinkeldiskordans, og betragtes skematisk deformationen af sådan diskordans mellem båndgnejs- og augengnejs-formationerne, ses det på fig. 6, at dette vil være en plausibel forklaring på det observerede billede. Den kile, der opstår mellem augengnejsen og båndgnejsen som resultat af diskordansen, kan ses på kortbilledet i den vestlige del af kortet og kan betragtes som en bekræftelse af diskordansens tilstedeværelse. Den vest-

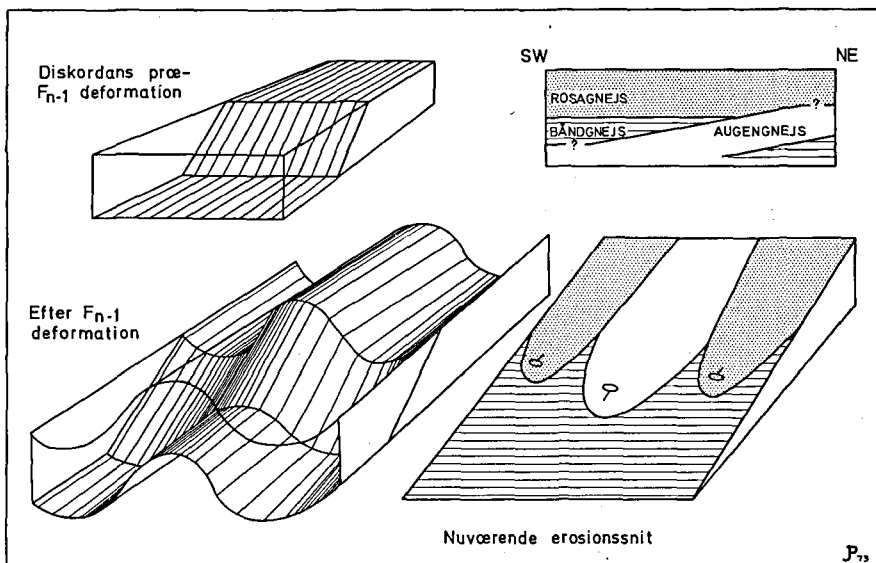


Fig. 6. Skematisk deformeret diskordans mellem augengnejs og båndgnejs i den vestlige del af området og det geometriske konsekvenser, det medfører for foldernes indbyrdes orienteringer.

lige grænse mellem augengnejs og båndgnejs er ikke kortlagt i detalje i forbindelse med den aktuelle kartering, men rekognoscering i området har bekræftet dens tilstedeværelse, og det er som tidligere nævnt karakteristisk, at augengnejsen i hovedparten af det kortlagte område grænser mod granitisk gnejs, som det også fremgår af det »nuværende« erosionssnit på fig. 6. Her er dog den sidste deformation fjernet for at forenkle figuren.

Det skal til forsøget på en geometrisk analyse af et kompleks foldet grundfjeldsområde tilføjes, at det tilsyneladende simple billede, der opstår, er udtryk for en forenklet beskrivelse af en mere kompliceret deformationsmekanisme. Det har desuden under fremstillingen været nødvendigt at udelade en række observationer, dels af mesoskopiske strukturelementers relationer, og dels af øvrige feltmæssige observationer. Observationer, der imidlertid synes at bekræfte denne model.

(Foredrag ved Dansk Geologisk Forenings forårsmøde i Århus 28. april 1973)

Litteratur

- Berthelsen, A., Bondesen, E. & Jensen, S. B. 1962: On the so-called Wildmigmatites. *Krystalinikum* 1, 31-49.
- Dahlström, C. D. A. 1954: Statistical Analysis of Cylindrical Folds. *Trans. canad. Min. Inst.* 57, 140-5.
- Fleuty, M. J. 1964: The Description of Folds. *Proc. geol. Assoc.* 75 (4), 461-492.
- Hudleston, P. J. 1972: Fold Morphology and some Geometrical Implications of Theories of Fold Development. *Tectonophys.* 16, 1-46.
- Lien, H. 1969: *En geologisk undersøgelse af en intrusiv hornblende augengneis i det prækambriske migmatitområde på Kvinesheia, Vest Agder, Syd Norge*, Thesis, Univ. Århus. 68 pp. (upubliceret).
- Ramsay, J. G. 1960: The Deformation of Early Linear Structures in Areas of Repeated Folding. *Jour. Geol.* 68, 75-93.
- Ramsay, J. G. 1962: The Geometry and Mechanics of Formation of 'Similar' Type Folds. *Jour. Geol.* 70, 309-27.
- Ramsay, J. G. 1967: *Folding and Fracturing of Rocks*. New York: McGraw-Hill. 555 pp.
- Thomsen, I. H. 1972: *En geologisk undersøgelse af båndgneis i et prækambrisk migmatit kompleks mellem Snartemo og Konsmo i Vest Agder, Sydnorge*. Thesis, Univ. Århus. 104 pp. (upubliceret).
- Turner, F. J. & Weiss, L. E. 1963: *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*. New York: McGraw-Hill. 545 pp.
- Weiss, L. E. 1959: Geometry of Superposed Folding. *Bull. geol. Soc. Amer.* 70, 91-106.