

Rapport

R13:1971

Byggnadsstatik

**Mekaniska spänningars
inverkan på mikro-
strukturen hos lera**

Roland Pusch

Byggforskningen

Mekaniska spänningars inverkan på mikrostrukturen hos lera

En undersökning av prekvartära och kvartära leriga sediment

Roland Pusch

Förutsättningen för en meningsfull undersökning av spänningsinfluerade mikrostrukturella förändringar i jordmaterial är dels att prepareringsmetoden som använts vid undersökningen inte förändrar materialets uppbyggnad, dels att de allmänna dragen hos denna uppbyggnad kan beskrivas statistiskt.

Författaren har använt en prepareringsmetod som innebär att porvattnet ersätts med etylalkohol och därefter med en plastmonomer. Efter polymerisering skärs ultratunna snitt av den preparerade leran. Snitten studeras sedan med hjälp av elektronmikroskopi. Metoden har visat sig på ett acceptabelt sätt bevara den naturliga mikrostrukturen. I denna rapport jämförs de mikrostrukturella mönstren hos lösa illitiska kvartära leror och hos mycket fasta kaolinitiska, illitiska och montmorillonitiska prekvartära leror, med särskild hänsyn till kompaktionens inverkan på mikroporstorleken och den "mikrostrukturella porositeten" samt till förekomsten av speciella mikrostrukturella former såsom domäner, dvs. grupper av parallellorienterade partiklar.

Den statistiska behandlingen av mik-

rofotografierna har omfattat bestämning av mikroporernas storleksfördelning, varvid porstorleken definierats som största tvärsnittsmåttet, och av den "mikrostrukturella porositeten" uttryckt som kvoten mellan sektionerad porarea och total snittyta.

Lösa kvartära illitiska leror avsatta i sötvatten, brackvatten och saltvatten har mikrostrukturmönster som kännetecknas av oregelbundet arrangerade partiklar samlade i aggregat som sammanbinds av länkar eller grupper av små partiklar, FIG. 1, 2. Aggregat- och porstorleken är en funktion av elektrolytinhålllet och halten och arten av organisk substans. Kärnfysikaliska mätningar antyder att vattenfasens ordningsgrad och viskositet är mycket betydande vid låg vattenhalt vilket innebär att aggregaten kan antagas fungera som hållfasta enheter.

Undersökningar av laboratoriekompakterad illitisk lera visar förekomsten av ett stort antal domäner, dvs. täta grupper av parallellställda partiklar mellan intakta aggregat och större partiklar. Domänerna kan tolkas som partikelgrupper som brutits ned vid lokalt skjuvbrott.

Mycket fasta, starkt kompakterade

Bygghforskningen Sammanfattningar

R13:1971

Nyckelord:

lera, sediment, kvartär, prekvartär, mikrostruktur, mekaniska spänningar, domänbildningar, elektronmikroskopi, porstorlek, porositet, kompaktion, skjuvspänningar

Rapport R13:1971 avser anslag C 439:4 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola.

UDK 624.131.4
553.61
624.131.37
SfB A

Sammanfattning av:

Pusch, R, 1971, *Mekaniska spänningars inverkan på mikrostrukturen hos lera*. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R13:1971, 27 s. ill. 9 kr.

Rapporten är skriven på både svenska och engelska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, 111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60

Abonnemangsgrupp:

(k) konstruktion



FIG. 1. Elektronmikrofotografier av ultratunna snitt av lös illitisk, marin Lilla Edet-lera.

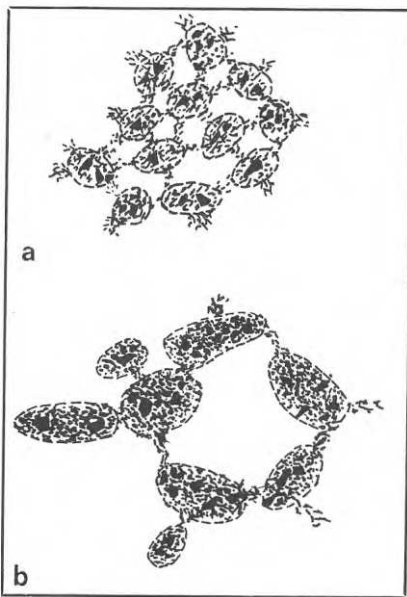


FIG. 2. Schematiskt partikelarrangemang. a) Sötvattenlera med små relativt porösa aggregat och små porer. b) Marin lera med stora, täta aggregat åtskilda av stora porer.

prekvartära lersediment har mikrostrukturmönster som i hög grad bestäms av mineralsammansättningen. De undersökta lersedimenten är med undantag för två tertiära leror kompakterade under ett tryck av 1 000–2 000 N/cm² orsakat av det pleistocena istäcket eller av sediment. De montmorillonitiska lerorna med Na som utbytbar jon karakteriseras av parallellt orienterade sammanvävda flak, medan Ca-montmorilloniterna har en aggregatartad uppbyggnad. De kaolinitiska och illitiska sedimenten kännetecknas av mer eller mindre oregelbundet anordnade partiklar i aggregat som omges av domänbildningar.

Jämförelse mellan statistiska mikrostrukturdata hos lösa och fasta naturliga sediment visar att porstorleken är starkt beroende av kompakteringstrycket. Det råder emellertid i vissa fall en jämförelsevis ringa skillnad i mikrostrukturell porstorlek och porositet hos lösa och fasta sediment som inte svarar mot den betydande skillnaden i hållfasthet och vattenhalt. Detta kan förklaras med att sammanpressningen av makroporer, som finns i

stort antal i lösa sediment, väsentligen svarar för den stora vattenhaltsreduktion som uppstår då höga tryck verkar. Också den lastöverförande effekten hos kontinuerliga nätverk av grövre partiklar kan ha spelat roll.

Den mest intressanta mikrostrukturella skillnaden mellan de lösa och fasta lerorna är den stora förekomsten av domäner i de sistnämnda lerorna av kaolinit- och illittyp. Domänerna är av liknande slag som observerades då lös illitisk lera starkt kompakterades i laboratorium. Dessa bildningar kan förklaras på följande sätt. Under loppet av kompaktionen försköts aggregaten, som betedde sig som stela kroppar, i samband med parallellorientering av de partiklar som utgjorde länkar mellan aggregaten. Denna orientering resulterade i bildningen av domäner som vreds utmed och mellan större partiklar och fasta aggregat när trycket successivt ökade, FIG 3. Sådana domäner kunde inte identifieras i prekvartära Na-montmorilloniter vilket kan förklaras av att dessa lersors regelbundna strukturmönster är mindre känsliga för höga tryck.

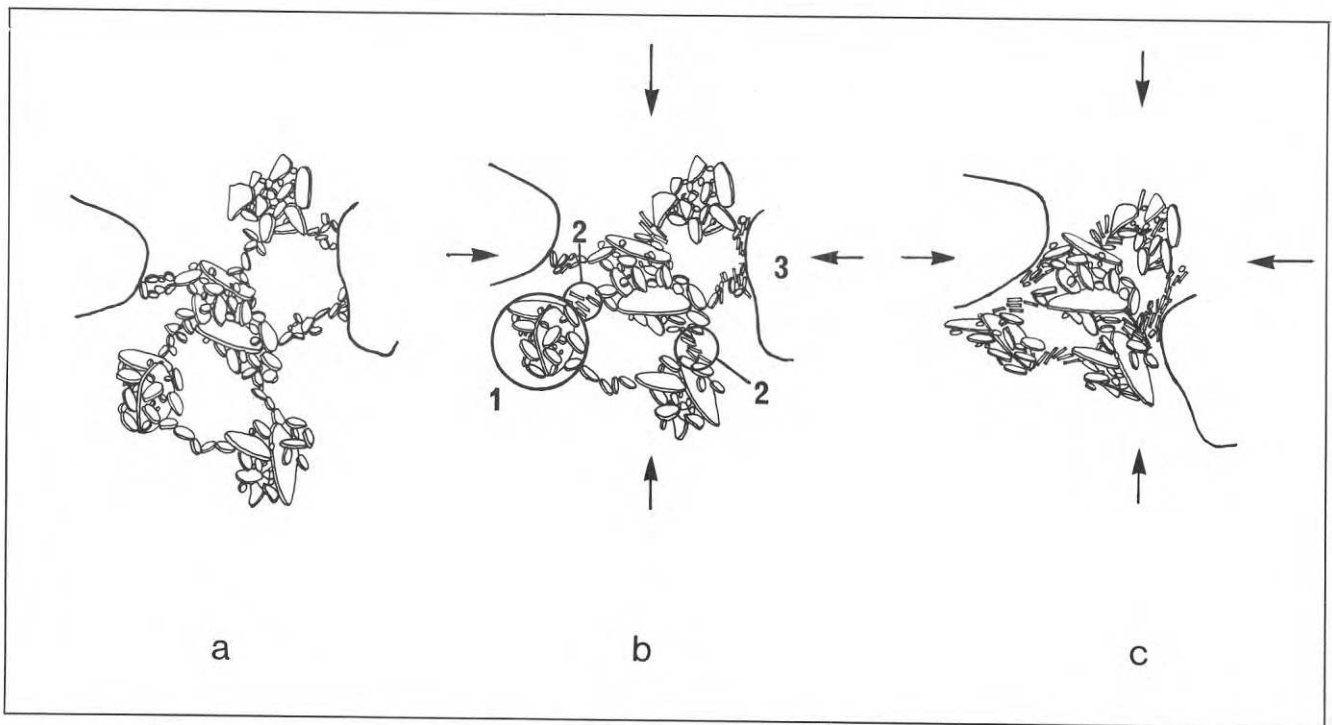


FIG. 3. Domänbildning i aggregerad lera. a) Löst tillstånd före sammanpressning. b) Första stadiet vid domänbildning orsakad av treaxligt tryck. c) Stora svängda domäner bildas under ökat tryck.

1 anger aggregat, 2 domän och 3 mjälakorn.

The influence of stress on clay microstructure

A study of pre-Quaternary and Quaternary clay sediments

Roland Pusch

The condition precedent for an adequate investigation of stress-influenced microstructural changes in soils is that the method of preparation which is used at the investigation has no influence on the microstructural pattern and that the general features of this pattern can be described by statistical means.

The author's preparation technique involves the replacement of the pore water with ethyl alcohol and, subsequently, with a plastic monomer. After polymerization the specimen is sectioned into ultrathin slices which can be investigated by means of electron microscopy. This technique is sufficiently accurate with regard to the preservation of the natural microstructure. The paper compares the microstructural patterns of soft illitic Quaternary clays and very stiff kaolinitic and montmorillonitic pre-Quaternary clays, paying particular attention to the influence of compaction on the size of the micropores and the "microstructural porosity" as well as the occurrence of special microstructural forms, such as domains, i.e. groups of particles oriented in a parallel way.

The statistical treatment of the micro-

photographs involved determination of the size distribution of the pores, their dimensions being expressed in terms of the longest intercept, and calculation of the "microstructural porosity" which is the ratio of the sectioned pore area and the total area of the examined section.

Soft Quaternary illitic clays deposited in fresh, brackish or salt water have microstructural patterns which consist of particle aggregates connected by links or groups of small particles (FIGS. 1 and 2). The size of aggregates and pores is a function of the electrolyte and of the content and kind of organic matter. Investigations based on nuclear physics indicate that the viscosity and degree of order of the water phase are of considerable magnitude at small water contents, which means that the aggregates may act like strong units.

Illitic clay compaction in the laboratory produces a high content of domains, e.g. dense groups of particles oriented in a parallel way between intact aggregates and larger grains. The domains can be interpreted as particle groups broken down by local shear failure.

Very stiff, heavily compacted pre-Quaternary clay sediments have microstruc-



FIG. 1. Electron micrographs of ultra-thin sections of soft, illitic marine Lilla Edet clay.

National Swedish Building Research Summaries

R13:1971

Key words:

clay, sediment, Quaternary, pre-Quaternary, microstructure, stress, formation of domains, electron microscopy, pore size, porosity, compaction, shear strain

Report R13:1971 was supported by Grant C 439:4 from the Swedish Council for Building Research to the Department of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Chalmers University of Technology.

UDC 624.131.4
553.61
624.131.37
SfB A

Summary of:

Pusch, R, 1971, *Mekaniska spänningars inverkan på mikrostrukturen hos lera*. The influence of stress on clay microstructure. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Report R13:1971, 27 p., ill. 9 Sw. Kr.

The report is in both Swedish and English with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

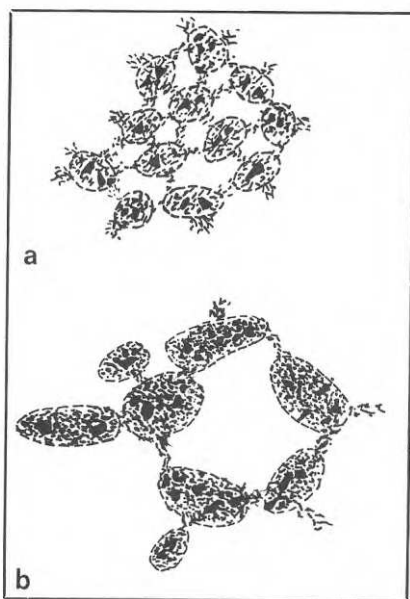


FIG. 2. Schematic clay particle arrangement. a) Clay deposited in fresh water, having small, relatively porous aggregates and small voids. b) Marine clay with large, dense aggregates separated by large voids.

tural patterns which are governed by the mineral composition. With the exception of two tertiary clays all the investigated sediments have been compacted under a pressure of 1000–2000 N/cm² caused by the Pleistocene ice sheet or by sediments. The montmorillonitic clays with Na as exchangeable ion are characterized by oriented interwoven flakes with a general parallel arrangement while Ca-montmorillonites are aggregated. The kaolinitic and illitic sediments consist of particles irregularly arranged in aggregates which are surrounded by domains.

If compared, the statistical microstructural data of the soft and stiff natural sediments showed that pore size is largely dependent on the pressure of compaction. However, in certain cases the microstructural pore size and porosity are not very different and the difference is not in correspondence to the large variation in strength and water content. This discrepancy may be explained by the assumption that the large amount of macro-pores in soft clays is responsible for the larger reduction of water content

by the action of high pressure. Also, the stress-transferring action of closely located silt particles may have been of importance.

The most interesting microstructural difference between the soft and stiff clays is the rich presence of domains in the last-mentioned kaolinitic and illitic clays. The domains show great similarity to the corresponding features in soft illitic clay which had been heavily compacted in the laboratory. The formation of the domains can be explained in the following way. In the course of compaction the aggregates, which behaved as rigid bodies, were mutually moved in connection with an alignment of the particles forming links between the aggregates. This alignment resulted in the formation of domains which were deformed and wrapped around larger particles and rigid aggregates when the pressure was increased (FIG. 3). Such domains could not be identified in pre-Quaternary Na-montmorillonites. The reason for this may be that the regular stratified patterns of such clays are less sensitive to high pressures.

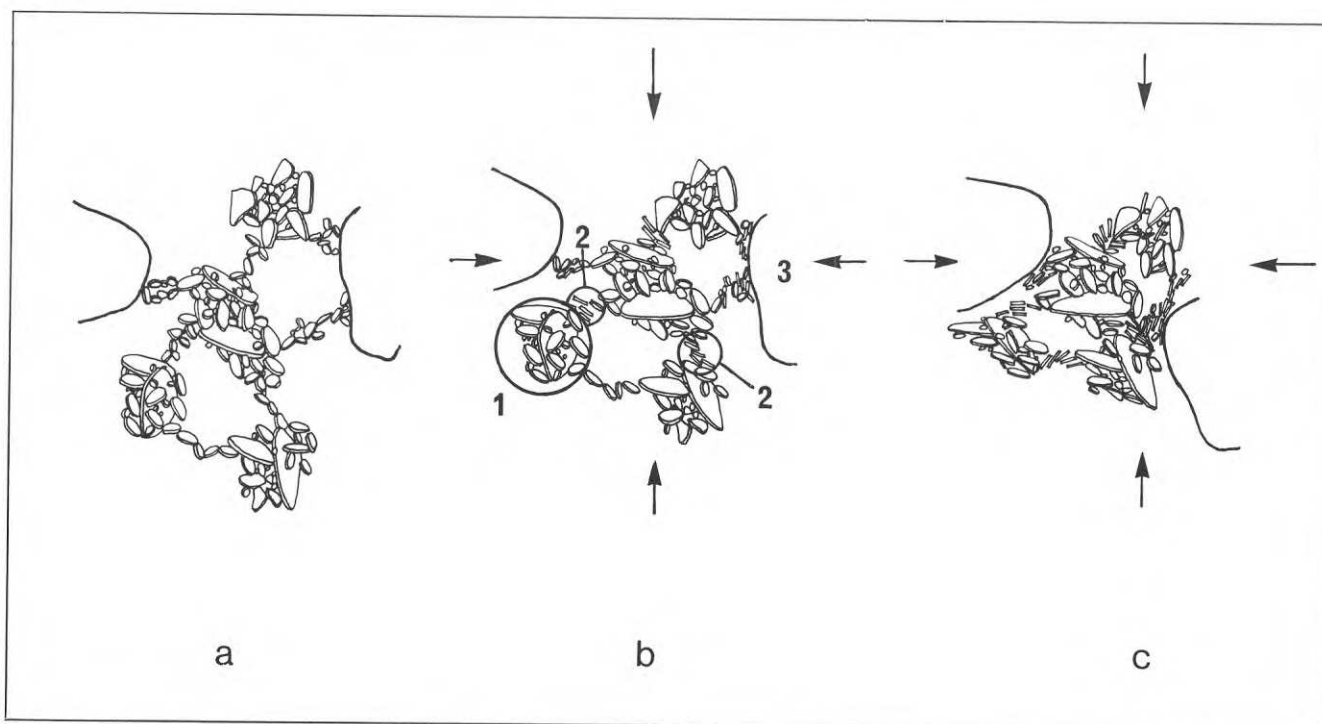


FIG. 3. Domain formation in aggregated clay. a) Uncompacted soft state. b) Initial stage of domain formation due to triaxial pressure. c) Large curved domains caused by increased pressure.

1 denotes aggregate, 2 domain and 3 silt grain.

Rapport R13:1971

MEKANISKA SPÄNNINGARS INVERKAN PÅ MIKROSTRUKTUREN HOS LERA

En undersökning av prekvartära och kvartära leriga sediment

THE INFLUENCE OF STRESS ON CLAY MICROSTRUCTURE

A study of pre-Quaternary and Quaternary clay sediments

av Roland Pusch

Denna rapport avser anslag C 439:4 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för geoteknik och grundläggning, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. Rapporten har författats av docent Roland Pusch. Försäljningsintäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

Author: Roland Pusch, Department of Soil Mechanics and Engineering Foundation, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Rotobekman AB, Stockholm 1971, 10 9013 1

INNEHÅLL/CONTENTS

Inledning	5
Mikrostrukturen hos lösa leror	5
Mikrostrukturen hos mycket fasta leror, starkt kompakterade leror	6
Deformationsprocesser under kompakteringsförloppet	8
Slutsatser	9
Litteratur	11
Figurer	20

CONTENTS

Introduction	13
Microstructure of soft clays	13
Microstructure of compacted stiff clays	14
Deformation process in the course of compaction	16
Conclusions	17
References	19
Figures	20

INLEDNING

För den tillämpade geologin är jordmaterialens mikrostruktur av speciellt intresse. Författaren har använt transmissionselektronmikroskopi för undersökning av porösa, lösa leror och starkt kompakterade¹⁾ fasta leror (PUSCH, 1970, 1971). I denna rapport sammanfattas resultaten med särskild hänsyn till kompaktionens inverkan på det mikrostrukturella mönstret.

För framställning av lämpliga preparat har författaren använt en metod som innebär att lerans porvatten ersätts med etylalkohol och herefter med en plastmonomer (butyl/metyl-metakrylat eller Epon) genom diffusion. Efter polymerisering är lerprovet tillräckligt hårt för att medge framställning av 0,05 μ m tjocka snitt med hjälp av en ultramikrotom. Denna teknik har visat sig på ett acceptabelt sätt bevara den naturliga mikrostrukturen (PUSCH, 1968).

Mikrofotografier av ultratunna snitt har använts för statistisk beskrivning av vissa mikrostrukturella egenskaper, såsom storleken och formen hos mikroporerna och för bedömning av orienteringen och kopplingen av lerpartiklarna. Den statistiska behandlingen har omfattat bestämning av mikroporernas storleksfördelning varvid porstorleken (a_p) definierats som största tvärsnittsmåttet och av den "mikrostrukturella porositeten" P/T där P är den sektionerade porarean och T den totala arean hos det undersökta ultratunna snittet (PUSCH, 1968). Den statistiska bearbetningen utfördes med användning av schematiska avbildningar av mikrofotografierna där all mineralsubstans och organisk substans oberoende av tätheten markerats svart och alla porer markerats vita (FIG. 1). Eftersom täthetsvariationerna inte återges råder inte något samband mellan den mikrostrukturella porositeten och det naturliga materialets verkliga porositet eller vattenhalt.

MIKROSTRUKTUREN HOS LÖSA LEROR

Lösa kvartära illitiska leror avsatta i sötvatten, brackvatten och salt vatten har undersökts med avseende på den mikrostrukturella uppbyggnaden (PUSCH, 1970). Samtliga undersökta leror har mikrostrukturmönster som kännetecknas av oregelbundet arrangerade partiklar samlade i aggregat som sammanbinds av länkar eller grupper av små partiklar. I de saltvattenavsatta lerorna är aggregaten större och tätare än de i de söt- och brackvattenavsatta sedimenten. De förstnämnda lerorna kännetecknas också av en viss frekvens stora porer som framgår av den schematiska bilden i FIG. 2.

Dessa typiska egenskaper illustreras av de statistiska parametrarna a_p och P/T . Sålunda är 95:e percentilen av a_p 0,35-0,80 μ m för de undersökta sötvatten- och brackvattenlerorna medan mot-

1) Med kompaktion avses enligt geologiskt språkbruk sammanpressning under inverkan av statisk last. Ordet är synonymt med det inom geotekniken gängse uttrycket kompression.

svarande värde för de saltvattenavsatta lerorna är 0,95-1,30 μm . Medianvärdet är 0,11-0,24 μm respektive 0,13-0,15 μm . Det mycket öppna partikel nätverket i de saltvattenavsatta lerorna svarar mot ett P/T -värde av 37,5-49,3 % medan motsvarande värde för de söt- och brackvattenavsatta lerorna är 9,4-24,9 % (TAB. 1). I starkt organisk brackvattenlera kan värdena på porstorleken och den mikrostrukturella porositeten vara ännu högre än i de saltvattenavsatta lerorna.

Typiska mikrofotografier av glacial Skå-Edebylera avsatt i sött vatten återges i FIG. 3a och av postglacial marin Lilla Edet-lera i FIG. 3b. Bilderna visar att aggregaten, som normalt innehåller en eller några få stora partiklar, är förenade av länkar av oregelbundet anordnade små partiklar. Partiklarnas inbördes koppling är av tre slag: "kant mot kant", "kant mot plan yta" och "plan yta mot plan yta". Endast ett litet antal domäner, definierade som täta grupper av parallellställda partiklar, kan identifieras. Partikelavståndet i aggregaten är mycket liten jämfört med medelvärdet på avståndet mellan partiklarna i leran. Kärnmagnetiska undersökningar (NMR) har visat att vattenmolekylernas rörlighet är mycket mindre nära mineralytorna än i fritt vatten vilket antas innebära att vattnet i aggregaten har mycket hög viskositet. Egenskaperna hos detta vatten ger sannolikt aggregaten en betydande stelhet till vilken de starka atomära bindningskrafterna mellan närbelägna partiklar naturligtvis bidrar.

MIKROSTRUKTUREN HOS MYCKET FASTA, STARKT KOMPakterade LEROR

Plastiska prekvartära lersediment av olika ålder och med olika sammansättning har undersökts med särskild hänsyn till det mikrostrukturella mönstret (PUSCH, 1971), Röntgendiffraktionsanalyser visade att lerorna kunde indelas i tre huvudgrupper med avseende på den mineralogiska sammansättningen: kaolinitisk kretaceisk lera från Skåne, illitisk kambrisk lera från Estland och silurisk lera från Gotland, och montmorillonitisk ordovicisk lera från Västergötland, triassisk lera från Skåne, kretaceisk lera ("Fish Clay") från Danmark och tertiär Londonlera samt tertiär lera från Danmark. Med undantag för den illitiska kambriska leran, vars bildningsförhållanden inte är fullständigt kända och för den kaolinitiska kretaceiska leran har samtliga leror avsatts i saltvatten enligt tidigare geologiska undersökningar. Den kaolinitiska leran antages vara avsatt i vatten med låg salthalt eftersom den uppvisar makrostrukturer som är kännetecknande för flodavsatta sediment. Med undantag för den tertiära Londonleran, som utsatts för ett tryck av endast ca 150 N/cm² av numera borteroderade överliggande sediment, har samtliga leror blivit starkt sammanpressade under inverkan av överliggande sediment eller av det pleistocena istäcket. I de flesta fall ger uppgifter i litteraturen om det pleistocena istäckets mäktighet den enda någorlunda säkra informationen om det största tidigare existerande trycket. Isens mäktighet svarar mot ett vertikalt tryck av storleksordningen 1000-2000 N/cm². Den tertiära danska leran har fått en lösare konsistens genom att stora skjuvspänningar orsakade av pleistocen istektonik påverkat sedimentet. Konsoliderade, dränerade skjuvförsök, antyder att lerorna inte är cementserade eller endast svagt cementserade och man kan antaga att

TAB. 1. Största tryck, vattenhalt och lerhalt samt mikrostrukturdata.

Sediment	Största tryck N/cm ²	Vattenhalt %	Lerhalt %	α_p i μm	$\frac{P}{T}$ %
Söt- och brackvatten- avsatt illitisk lera, Låg eller normal or- ganisk halt (kvartär)	3,2-5,6	65-105	54-77	0,11-0,24	9,4-24,9
Marin illitisk lera med låg organisk halt (kvartär)	7,8-11,8	58-97	40-76	0,13-0,15	37,5-49,3
Kaolinitisk lera, sanno- likt avsatt i sötvatten (kretaceisk)	≥ 1000	21,9	43	0,11	9,3
Marin illitisk lera (silurisk)	> 1000	12-15	32-34	0,20	37,2
Marina montmorillonitiska leror (ordovicisk och triassic)	≥ 1000	7-28	8-38	0,12	1,5-7,0
Marin montmorillonitisk lera (kretaceisk "Fish clay")	≥ 1000	34,4	43	0,30	12,7
Marina montmorillonitiska leror (tertiära)	150 ^{a)}	34,6-38,2	47-65	0,29-0,33	14,5-15,8

a) En av lerorna har sammanpressats under ett tryck av minst 1000 N/cm² men har fått en lösare konsistens genom inverkan av istektonik.

denna egenskap har kännetecknat dessa leror från tiden för deras bildning i naturen. Författaren har därför antagit att de observerade mikrostrukturmönstren utbildades under inverkan av det största existerande trycket - med undantag för den tertiära danska leran - oberoende av vid vilken tidpunkt detta tryck verkade. Skjuvförsöken visade dessutom att de nämnda lerorna är genomdragna med system av mycket fina sprickor.

Den statistiska tolkningen av mikrofotografierna visade att de montmorillonitiska kretaceiska och tertiära lerorna har den största porstorleken vilket illustreras av att medianvärdet av a_p är 0,29-0,33 μm medan den kaolinitiska leran och de montmorillonitiska ordoviciska och triassiska lerorna kännetecknas av en mycket liten porstorlek vilket framgår av medianvärdet, 0,11-0,12 μm . Den illitiska siluriska leran har medianvärdet 0,20 μm . Motsvarande P/T -värde för den kaolinitiska leran och de montmorillonitiska ordoviciska och triassiska lerorna ligger inom intervallet 1,5-9,3 %, medan värdet för de yngre montmorillonitiska lerorna är 12,7-15,8 %. Den illitiska siluriska leran har ett P/T -värde av 37,2 % vilket innebär ett mycket poröst mikrostrukturellt mönster. Den kambriska lerans strukturparametrar har inte antagits vara representativa för det naturliga materialet eftersom det undersökta lerprovet var uttorkat före undersökningen. Dess P/T -värde, som möjligen påverkats relativt obetydligt av uttorkningen, är 6,7 %, (TAB. 1).

Lerpartiklarnas geometriska arrangemang visar sig ha samband med lermineralogin. Sålunda kännetecknas den triassiska och de tertiära lerorna, vilka är montmorillonitiska med Na som utbytbar jon, av system av parallellt orienterade sammanvävda flak med anordningen "plan yta mot plan yta" (FIG. 4) medan den kretaceiska "Fish clay", som är en Ca-montmorillonit, består av aggregat som har varierande orientering och som är kopplade via länkar av godtyckligt anordnade mindre partiklar. I den ordoviciska leran som har Ca som utbytbar jon är partiklarna anordnade i domänlika grupper med varierande orientering men det allmänna mönstret är övervägande av samma slag som i Na-lerorna. Detta kan förklaras av att Na var det ursprungliga utbytbara jonslaget (FIG. 5). Den kaolinitiska och de illitiska lerorna kännetecknas av mer eller mindre oregelbundet anordnade partiklar i aggregat som förenas och omges av domänbildningar. Domänernas utseende ger ett intryck av att utgöra lokala flytstrukturer eftersom partiklarna tycks ha pressats mellan större partiklar och aggregat (FIG. 6).

DEFORMATIONSPROCESSER UNDER KOMPakterINGSFÖRLOPPET

Det är välkänt att den primära effekten av ett högt tryck på ett finkornigt klastiskt sediment är en reduktion av porutrymmet. Detta framgår i första hand av den lägre vattenhalten hos de prekvartära än hos de kvartära lerorna (TAB. 1). Också mikrostrukturen har påverkats vilket exempelvis framgår av att porstorleken och den mikrostrukturella porositeten är mycket mindre hos de starkt sammanpressade ordoviciska och triassiska lerorna än hos de mindre tryckpåverkade tertiära lerorna, vilka alla troligen bildats som marina Na montmorilloniter.

Vidare har de lösa kvartära söt- eller brackvattenavsatta lerorna större porer och högre porositet än den kretaceiska kaolinitiska leran som antas ha avsatts i vatten med låg salthalt. Den olikartade mineralsammansättningen kan dock ha viss betydelse. Den illitiska siluriska leran och den montmorillonitiska kretaceiska leran har en betydligt högre mikrostrukturell porositet än de övriga prekvartära lerorna med liknande spänningshistoria. De båda lerorna kännetecknas av kontinuerliga nätverk av mjälpartiklar och grövre partiklar vilka kan ha överfört de mekaniska spänningarna och lämnat systemet av lerpartiklar relativt opåverkat. Den jämförelsevis ringa skillnaden i mikrostrukturell porstorlek och porositet mellan de lösa kvartära och de fasta prekvartära lerorna, som inte svarar mot den betydande skillnaden i hållfasthet och vattenhalt (58-105 % för de lösa lerorna och 7-38 % för de fasta lerorna), kan förklaras genom att sammanpressningen av makroporer som finns i stort antal i lösa sediment (PUSCH, 1964), väsentligen svarar för den stora vattenhaltsreduktion som uppstår då höga tryck verkar. Beträffande mikroporstorleken kan man antaga att kompaktion primärt orsakar en anisotrop deformation och inte en isotrop minskning av porerna. Porformen är sålunda övervägande elongerad i de undersökta prekvartära lerorna. Sannolikt innebär kompaktionen att många små porer sammanpressas till så små dimensioner att de inte kan identifieras vilket innebär att porstorlekens medianvärde hos de starkt tryckpåverkade lerorna blir jämförelsevis högt.

Det bör påpekas att andra faktorer än överlagringstrycket, t.ex. mineralsammansättning, kornstorleksfördelning, sedimentationshastighet, organisk halt och elektrolytinhåll säkerligen är av betydelse för utbildningen av strukturmönstret. En ingående jämförelse av strukturparametrarnas värden hos de kvartära och prekvartära lerorna kan därför knappast göras.

Den mest intressanta mikrostrukturella skillnaden mellan de lösa och fasta, starkt kompakterade lerorna är förekomsten av domäner i de sistnämnda lerorna av kaolinit- och illittyp. Observation av mikrostrukturella förändringar i lös illitisk lera kompakterad i laboratorium har visat att sådana domäner utbildas under inverkan av högt tryck. Sådana förändringar, vilka uppkom i Skå-Edebylera under inverkan av trycket 128 N/cm^2 i en ödometer, kännetecknas av en störning av ursprungligen oregelbundet anordnade partiklar i länksystemen. Underloppet av kompaktionen försköts aggregaten, som betedde sig som stela kroppar, i samband med parallellorientering av de partiklar som utgjorde länkar mellan aggregaten. Denna orientering resulterade i bildningen av domäner som vreds utmed och mellan större partiklar och fasta aggregat när trycket successivt ökades (FIG. 7). Liknande undersökningar av skjuvade lerprover har visat att sådana mikrostrukturella störningar orsakas av interna skjuvspänningar (PUSCH, 1970).

SLUTSATSER

Förekomsten av domäner av likartat slag i starkt lös illitisk lera som starkt kompakterats på laboratorium, och i naturliga starkt kompakterade illitiska sediment ger belägg för ursprunget

hos denna mikrostrukturella detalj. De interna deformationerna i ett lersediment under kompaktion kan förklaras på följande sätt. Länksystemen, som skapar kontinuiteten hos partikelnätverkets primära enheter - aggregaten - och som kan vara den främsta orsaken till lerans kohesion, representerar dess svagaste delar. Under sedimentationens gång ökar belastningen, men mera betydande mikrostrukturella förändringar inträffar inte om sedimentationshastigheten är långsam och belastningen måttlig, eftersom systemet av länkar och aggregat sannolikt anpassar sig och förändras i fas med belastningsökningen. Antalet domäner, som antyder lokalt skjuvbrott, är därför ganska ringa i lös lera. Om belastningshastigheten är hög såsom vid uppförandet av ett byggnadsverk på sedimentet eller vid snabb avsättning av överlagrande sediment, bryts de svagaste delarna av partikelnätverket ned med domänbildning som följd, medan de stela aggregaten förblir i huvudsak opåverkade (FIG. 8). Även om belastningsökningen är mycket långsam uppkommer dock domäner om trycket är högt. Vid mycket höga tryck deformerar också aggregaten, och antalet mera omfattande domäner ökar, samtidigt som den typiska pressade formen utbildas.

Domäner av det slag som observerades i de illitiska lerorna observerades inte i de prekvartära montmorillonitiska sedimenten. Det är troligt att det karakteristiska systemet av parallellorienterade montmorillonitflak med koppling av typen "plan yta mot plan yta" uppkom redan i ett tidigt skede av sedimentbildningen och att det senare uppkommande höga trycket endast orsakade en minskning av porositeten eftersom det regelbundna skiktade strukturmönstret sannolikt var mindre känsligt för omfattande störning än illitisk leras aggregatmönster. Frånvaron av domäner i den kretaceiska "Fish clay", som har ett mikrostrukturmönster som liknar de illitiska kvartära lerornas, kan förklaras av att leran har ett autigent ursprung.

Den observerade svängda formen hos montmorillonitskikten i den ordoviciska leran kan ha orsakats av högt tryck, mineraltransformation eller termisk inverkan.

LITTERATUR

- Pusch, R., 1964 On the structure of clay sediments. Byggforskningen, Handling No. 48.
- Pusch, R., 1968 A technique for investigation of clay microstructure. Byggforskningen, Rapport No. 28.
- Pusch, R., 1970 Clay microstructure. A study of the microstructure of soft clay with special reference to their physical properties. Byggforskningen, Document D:8.
- Pusch, R., 1971 Microstructural features of pre-Quaternary clays. Under tryckning.

THE INFLUENCE OF STRESS ON CLAY MICROSTRUCTURE

A study of pre-Quaternary and Quaternary clay
sediments

INTRODUCTION

In applied geology soil microstructure is of special interest. The author has applied transmission electron microscopy in the study of highly porous, soft clays and of heavily compacted¹⁾, stiff clays (PUSCH, 1970 and 1971). The results of these investigations are summarized in this report with special reference to the influence of stress on the microstructural pattern.

Suitable compounds were obtained by means of a technique which involves a step-wise replacement of the pore water with ethyl alcohol and, subsequently, with a plastic monomer (butyl/methyl methacrylate or Epon) through diffusion. After polymerization the clay specimen is hard enough to be sectioned into 0.05 μm thick slices with an ultra-microtome. This technique is sufficiently accurate with regard to the preservation of the natural microstructure (PUSCH, 1968).

Micrographs of the ultra-thin sections have been used for statistical description of certain microstructural features, such as size and shape of sectioned pores, and for identification of orientation and association of clay-size particles. The statistical description involved determination of the size distribution of the pores, the dimensions of the pores being expressed in terms of their longest intercept a_p , and calculated of the "microstructural porosity" P/T where P is the sectioned pore area and T is the total area of the examined section (PUSCH, 1968). The statistical treatment was based on schematic reproductions of the micrographs in which the mineralogic and organic substances were marked in black independent of variations in density and in which all pores were marked in white (FIG. 1). Since the density variations were not reproduced there is no relationship between the "microstructural porosity" and the real porosity or water content of the natural clay.

MICROSTRUCTURE OF SOFT CLAY

Soft Quaternary illitic clays deposited in fresh, brackish and salt water have been investigated with regard to the microstructural properties (PUSCH, 1970). All the clays were found to have microstructural patterns which consist of particle aggregates connected by links or groups of small particles. In the marine clays the aggregates are larger and denser than in the fresh- and brackish-water clays. Also, the marine clays are characterized by a certain frequency of large pores as shown by the schematic drawings in FIG. 2. These typical features are illustrated by the statistical parameters a_p and P/T . Thus, the 95th percentile value of a_p is 0.35-0.80 μm for the investigated fresh- and brackish-water clays while it is 0.95-1.30 μm for the marine clays, the median value being 0.11-0.24 μm and 0.13-0.15 μm respectively. The very open particle network in the marine

1) In geology compaction means volume decrease caused by static load. This term is synonymous with the expression compression used in soil mechanics.

clays corresponds to a P/T -value of 37.5-49.3 %, while this parameter was found to take the value 11.3-24.9 % in the fresh- and brackish-water clays (TAB. 1). In highly organic clay deposited in brackish water the pore size and "Microstructural porosity" may be even higher than in the marine clays.

Some representative micrographs of glacial Skå-Edeby clay deposited in fresh water and of postglacial marine Lilla Edet clay are shown in FIG. 3. It can be seen that the aggregates, which generally contain one or a few large particles, are connected by links of haphazardly arranged small particles. The modes of particle association are of the three types: edge-to-edge, edge-to-face and face-to-face. Only a small number of domains, defined as dense groups of crystals oriented in a parallel way can be indentified in the micrographs.

The interparticle distance in the aggregates is very small compared with the average particle distance in the clay. Investigations based on nuclear magnetic resonance technique (NMR) have shown that the molecular mobility of the water close to clay mineral surface is much smaller than that of free water, meaning that the intra-aggregate water probably has a very high viscosity. Hence, the water properties give the aggregates a considerable rigidity. Naturally, the strong atomic bonds between the closely located minerals also contribute to the rigidity.

MICROSTRUCTURE OF COMPACTED, STIFF CLAYS

Plastic pre-Quaternary clay sediments of various age and composition have been investigated with special reference to the microstructure (PUSCH, 1971), X-ray diffraction analyses showed that the clays could be ranged into three main groups with regard to the clay mineralogy: kaolinitic Cretaceous clay from Skåne, illitic Cambrian clay from Esthonia and Silurian clay from Gotland, and montmorillonitic Ordovician clay from Västergötland, Triassic clay from Skåne, Cretaceous "Fish" clay from Denmark, Tertiary London clay and Tertiary clay from Denmark. All the clays, with the exception of the illitic Cambrian and kaolinitic Cretaceous clays, are thought to have been deposited in marine environment according to previous geological investigations. The kaolinitic clay is assumed to have been deposited in water with a small electrolyte content since it shows macrostructural features which are characteristic of river-deposited sediments. Except for the Tertiary London clay, which has been affected by a pressure of only about 150 N/cm² by sediments which were later eroded, all the clays have been heavily compacted in nature by overlying sediments or by the Pleistocene ice sheet. In most cases published ice data give the only fairly reliable information about the maximum previously acting pressure. The estimated thickness of the ice sheet corresponds to a vertical pressure of the order of 1000-2000 N/cm². The Tertiary Danish clay has been softened by large shear strain caused by Pleistocene ice-tectonics. Consolidated, drained shear tests indicate that the clays are not or only weakly cemented and it can be assumed that this property has been preserved from the time of formation in nature. Thus, it is assumed that the observed micro-

TAB. 1. Maximum pressure, water content, clay content and microstructural data.

Sediment	Maximum pressure N/cm ²	Water content %	Clay content %	a_p in μm	$\frac{P}{T}$ %
Illitic clay deposited in fresh or brackish water. Low or intermediate organic content (Quaternary)	3.2-5.6	65-105	54-77	0.11-0.24	9.4-24.9
Marine illitic clay with low organic content (Quaternary)	7.8-11.8	58-97	40-76	0.13-0.15	37.5-49.3
Kaolinitic clay probably deposited in fresh water (Cretaceous)	≥ 1000	21.9	43	0.11	9.3
Marine illitic clay (Silurian)	> 1000	12-15	32-34	0.20	37.2
Marine montmorillonitic clays (Ordovician and Triassic)	≥ 1000	7-28	8-38	0.12	1.5-7.0
Marine montmorillonitic clay (Cretaceous "Fish clay")	≥ 1000	34.4	43	0.30	12.7
Marine montmorillonitic clays (Tertiary)	150 ^{a)}	34.6-38.2	47-65	0.29-0.33	14.5-15.8

^{a)} One of the clays has been affected by a pressure of at least 1000 N/cm² but has been softened by large strain due to ice tectonics.

structural patterns were formed by the action of the maximum pressure - with the exception of the Tertiary Danish clay - independent of the time at which this pressure existed. Furthermore the shear tests showed that the clays are finely fissured.

The statistical interpretation of the micrographs showed that the montmorillonitic Cretaceous and Tertiary clays have the largest average pore size, the median value of a_p being 0.29-0.33 μm , while the kaolinitic clay and the montmorillonitic Ordovician and Triassic clays are characterized by very small pores as shown by the median values of $a_p = 0.11-0.12 \mu\text{m}$. The Median value of a_p for the illitic Silurian clay was found to be 0.20 μm . The P/T -value is in the range of 1.5-9.3 % for the kaolinitic clay and the montmorillonitic Ordovician and Triassic clays while it is 12.7-15.8 % for the younger montmorillonitic clays. The illitic Silurian clay has a P/T -value of 37.2 % which indicates a very open particle arrangement. The parameters of the Cambrian clay were not assumed to be reliable because the clay specimen was in a dry condition prior to the structural investigation. Its P/T -value, which may not have been seriously affected by the drying, was found to be 6.7 % (TAB. 1).

The geometrical arrangement of the clay particles is related to the clay mineralogy. Thus, the Triassic and Tertiary clays, which are montmorillonitic with Na as exchangeable ion, are characterized by a system of parallel interwoven laminae of face-to-face associated montmorillonite flakes (FIG. 4), while the Cretaceous Fish clay, which is a Ca-montmorillonite, consists of aggregates of irregularly arranged particles connected by links of small particles. In the Ordovician clay with Ca as exchangeable ion the particles are arranged in domain-like groups with a varying orientation but the general pattern is still mainly of the Na clay type (FIG. 5). This discrepancy can be explained if it is assumed that Na was the original exchangeable ion. The kaolinitic and illitic clays are characterized by aggregates of irregularly arranged particles connected and surrounded by domains. The appearance of the domains gives the impression that the clay are local flow structures since the particles seem to have been squeezed between larger grains and aggregates (FIG. 6).

DEFORMATION PROCESS IN THE COURSE OF COMPACTION

The primary effect of a high pressure on fine-grained clastic sediments is known to be a reduction in pore space. This is primarily indicated by the lower water content of the pre-Quaternary clays than of the Quaternary clays (TAB. 1). The microstructure is also affected as is illustrated by the much smaller pore size and microstructural porosity of the heavily compacted Ordovician and Triassic clays than of the less loaded Tertiary clays, all of them probably having been formed as marine Na-montmorillonites. Similarly, the soft Quaternary fresh- and brackish water clays have larger pores and a higher microstructural porosity than the Cretaceous kaolin sediment which is assumed to have been formed in water with a low electrolyte

content. However, the different mineralogy may be of some importance. The illitic Silurian clay and the montmorillonitic Cretaceous clay have microstructural porosities which are considerably higher than for the other clays affected by a pressure of a similar order of magnitude. The first-mentioned clays are characterized by networks of closely located silt particles which may have transferred the induced stresses leaving the clay matrix relatively unaffected. The fairly small difference in pore size and microstructural porosity of the soft Quaternary and the stiff pre-Quaternary clays which is not in accordance with the considerable variations in strength and water content (58-105 % for the soft clays and 7-38 % for the stiff clays) may be explained by the large amount of macro-pores in soft clays (PUSCH, 1964), the compression of which is responsible for the large reduction of water content by the action of high pressure. As concerns the pore size it can be assumed that compaction primarily causes a flattening of the pores and not an isotropic compression. Thus, the pores are mainly elongated in the investigated pre-Quaternary clays. Probably compaction involves a closing of many small pores to such a small size that they cannot be identified in the micrographs. This means that the median value of the pore size of a heavily compacted clay is relatively high.

It must be stressed that factors other than pressure, such as the mineralogical composition, particle size distribution, sedimentation rate, organic and electrolyte composition influence the development of the microstructural pattern. Hence, a detailed comparison between the values of the structural parameters of the Quaternary and pre-Quaternary clays can hardly be made.

The most interesting microstructural difference between the soft and heavily compacted clays is the presence of domains in the last-mentioned kaolinitic and illitic clays. Such domains are developed by the influence of a high pressure as shown by observed microstructural changes in soft illitic clays compacted in the laboratory (PUSCH, 1970). These changes, which occurred in Skå-Edeby clay samples subjected to a pressure of 128 N/cm^2 in an oedometer, are characterized by a distortion of the arrangement of originally irregularly associated linking particles. In the course of compaction the aggregates, which were found to behave as rigid bodies, were mutually moved in connection with an alignment of the particles forming links between the aggregates. This alignment resulted in the formation of domains which were deformed and wrapped around larger particles and rigid aggregates when the pressure was increased (FIG. 7). Such microstructural distortions are caused by internal shear stresses as concluded from similar investigations of sheared samples (PUSCH, 1970).

CONCLUSIONS

The presence of domains of a similar type in soft illitic clays, which was compacted in the laboratory, and in natural, heavily loaded illitic sediments gives evidence of the origin of this microstructural feature. The internal deformations of a clay sediment being compacted may be explained in the following way. The particle links which create the continuity of the primary

units of the particle network - the aggregates - and which may be responsible for the cohesion of the clay, represent its weakest parts. In the course of sedimentation the load is increased but no large microstructural changes occur if the sedimentation rate is slow and the load moderate, since the links and aggregates probably adjust themselves in phase with the loading rate. Therefore, the number of domains which indicate local shear failure is fairly small in soft clay. If the load rate is rapid as in the case of erecting a building on the sediment or in the case of rapid deposition of additional sediments, the weakest parts of the clay particle system are distorted resulting in the formation of domains, while the rigid aggregates are relatively unaffected (FIG. 8). Also in the case of a slow loading rate domains will finally develop if the pressure is very high. In this case, the aggregates are also affected and the number and extension of the domains is largely increased, the typical squeezed shape of the domains being developed as well.

Domains of the types found in the illitic clays were not observed in the pre-Quaternary sediments which contained Na-montmorillonite. It may be assumed that the system of aligned laminae of face-to-face associated montmorillonite flakes was developed already at an early stage of the sediment formation and that the subsequently developed high pressure in nature only caused a reduction in pore space, the regular stratified pattern probably being less sensitive to large microstructural changes than the aggregated pattern of illitic clay. The lack of domains in the Cretaceous "Fish clay", with a microstructural pattern which is similar to that of the illitic Quaternary clays, may be explained by an authigenic origin. The observed curved shape of the laminae in the Ordovician clay may have resulted from high pressure, mineral transformation or thermal influence.

REFERENCES

- Pusch, R., 1964 On the structure of clay sediments.
Byggforskningen, Handling No. 48.
- Pusch, R., 1968 A technique for investigation of clay
microstructure. Byggforskningen,
Rapport No. 28.
- Pusch, R., 1970 Clay microstructure. A study of the
microstructure of soft clays with
special reference to their physical
properties. Byggforskningen,
Document D:8.
- Pusch, R., 1971 Microstructural features of pre-
Quaternary clays. In press.

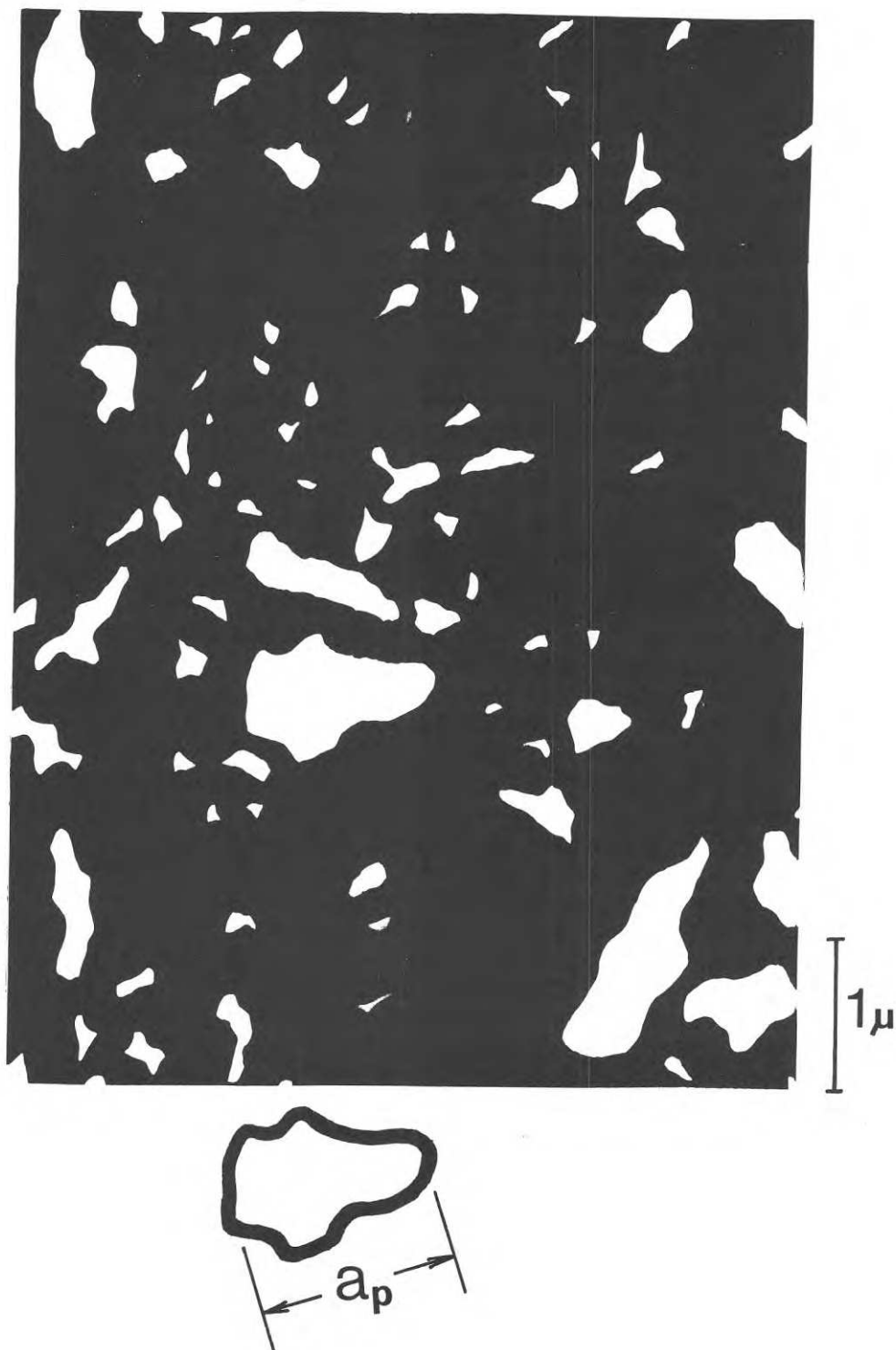


FIG. 1. Schematisk reproduktion av elektronmikrofotografi. Det kontinuerliga partikelnätverket är återgivet svart utan hänsyn till täthetsvariationer. Porsystemet, som består av diskreta sektionerade porer vars storlek definieras i bilden, är återgivet vitt (Skå-Edebylera).

Schematic reproduction of electron micrographs. The continuous particle network is marked in black without reference to variations in density. The pore system consisting of discrete sectioned pores, the size of which is defined in the picture, is marked in white (Skå-Edeby clay).

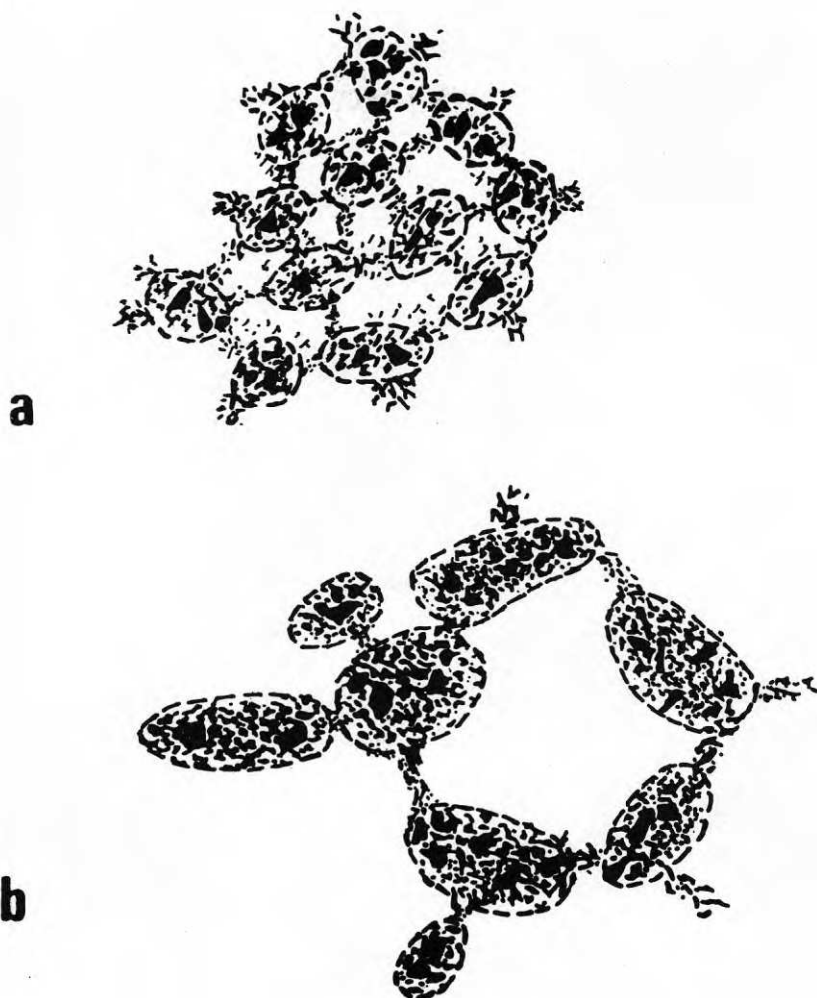


FIG. 2. Schematiskt partikelarrangemang. a) Sötvattenlera med små relativt porösa aggregat och små porer. b) Marin lera med stora, täta aggregat åtskilda av stora porer.

Schematic clay particle arrangement. a) Clay deposited in fresh water, having small, relatively porous aggregates and small voids. b) Marine clay with large, dense aggregates separated by large voids.

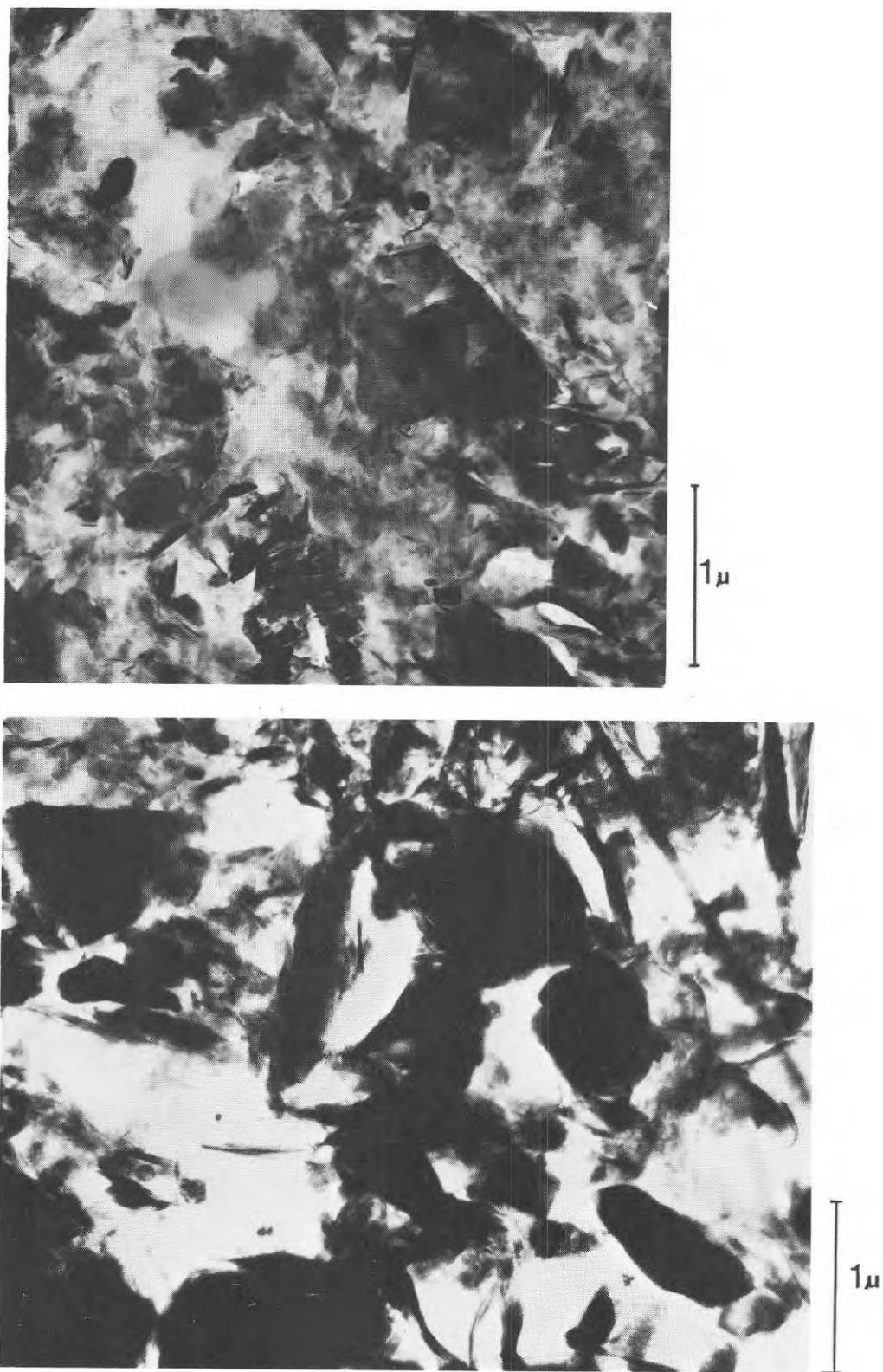


FIG. 3. Elektronmikrofotografier av ultratunna snitt av lös illitisk lera. a) Skå-Edebylera avsatt i sötvatten. b) Marin Lilla Edetlera.

Electron micrographs of ultra-thin sections of soft, illitic clays. a) Skå-Edeby clay deposited in fresh water. b) Marine Lilla Edet clay.

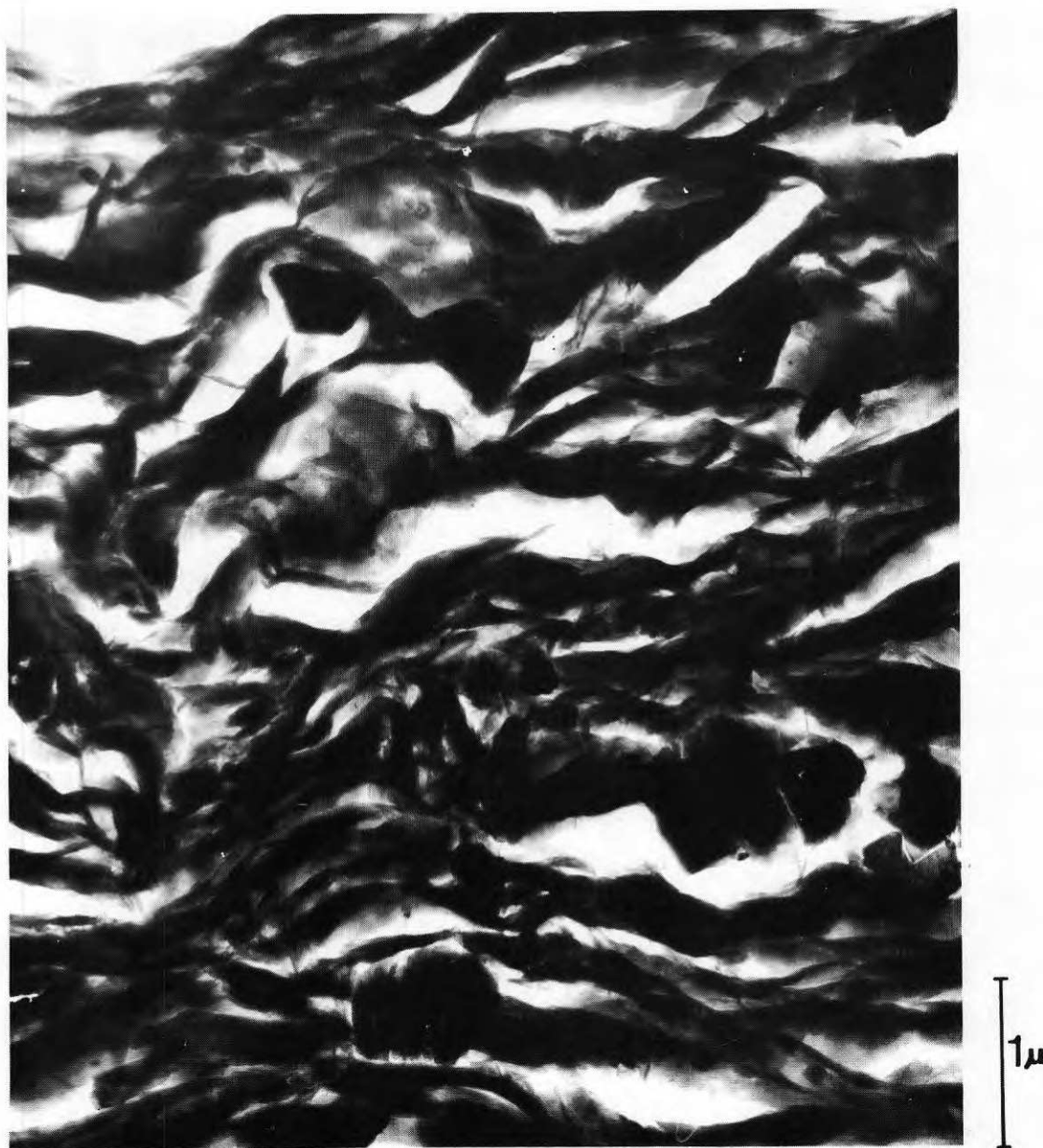


FIG. 4. Elektronmikrofotografi av ett ultratunt snitt av Londonlera (Na-montmorillonit).

Electron micrograph of an ultra-thin section of London clay (Na-montmorillonite).



FIG. 5. Elektronmikrofotografi av ett ultratunt snitt av montmorillonitisk ordovicisk lera.

Electron micrograph of an ultra-thin section of montmorillonitic Ordovician clay.

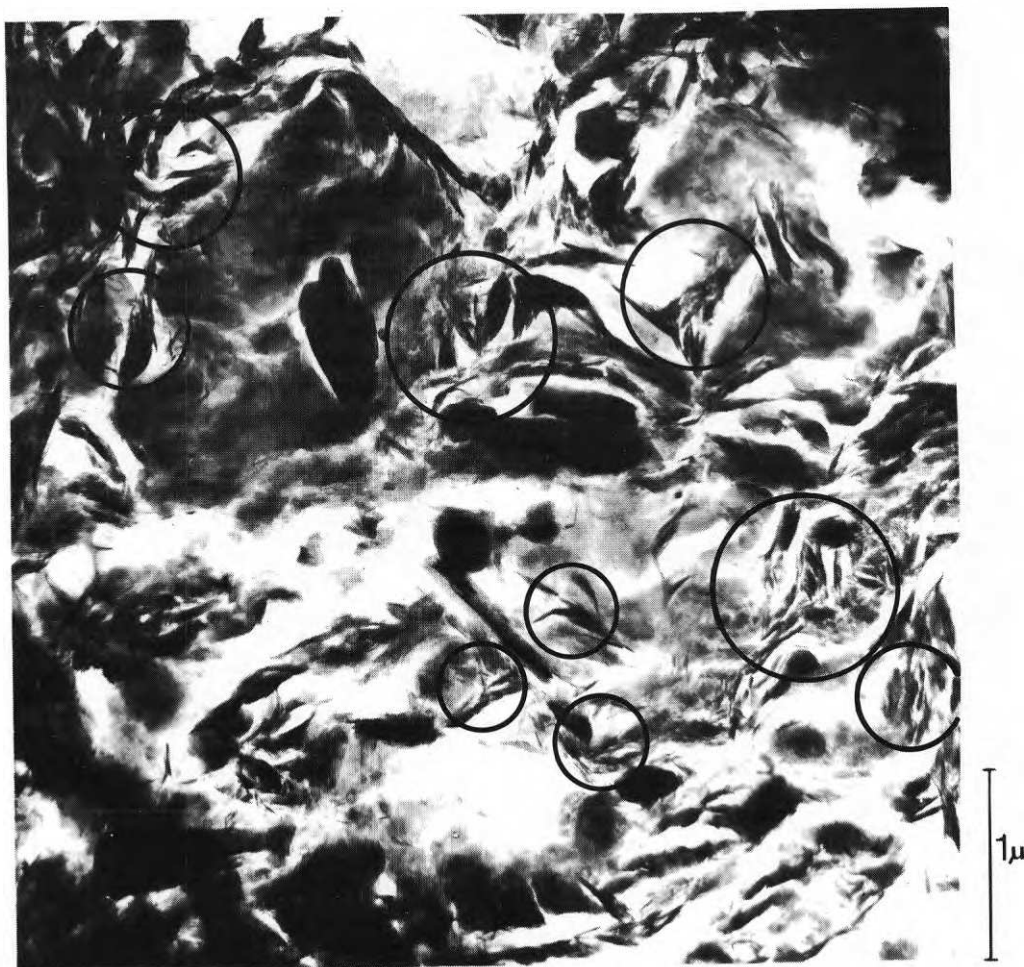


FIG. 6. Elektronmikrofotografi av ett ultratunt snitt av illitisk silurisk lera. Domäner inringade.

Electron micrograph of an ultra-thin section of illitic Silurian clay. Domains encircled.



FIG. 7. Elektronmikrofotografi av ett ultratunt snitt av glacial Skå-Edebylera som utsatts för ett tryck av 128 n/cm^2 . Observera förekomsten av liknande domänbildningar i FIG. 6 och 7 (inringade).

Electron micrograph of an ultra-thin section of glacial Skå-Edeby clay subjected to a pressure of 128 N/cm^2 . Notice the presence of similar domain types in FIGS. 6 and 7 (encircled).

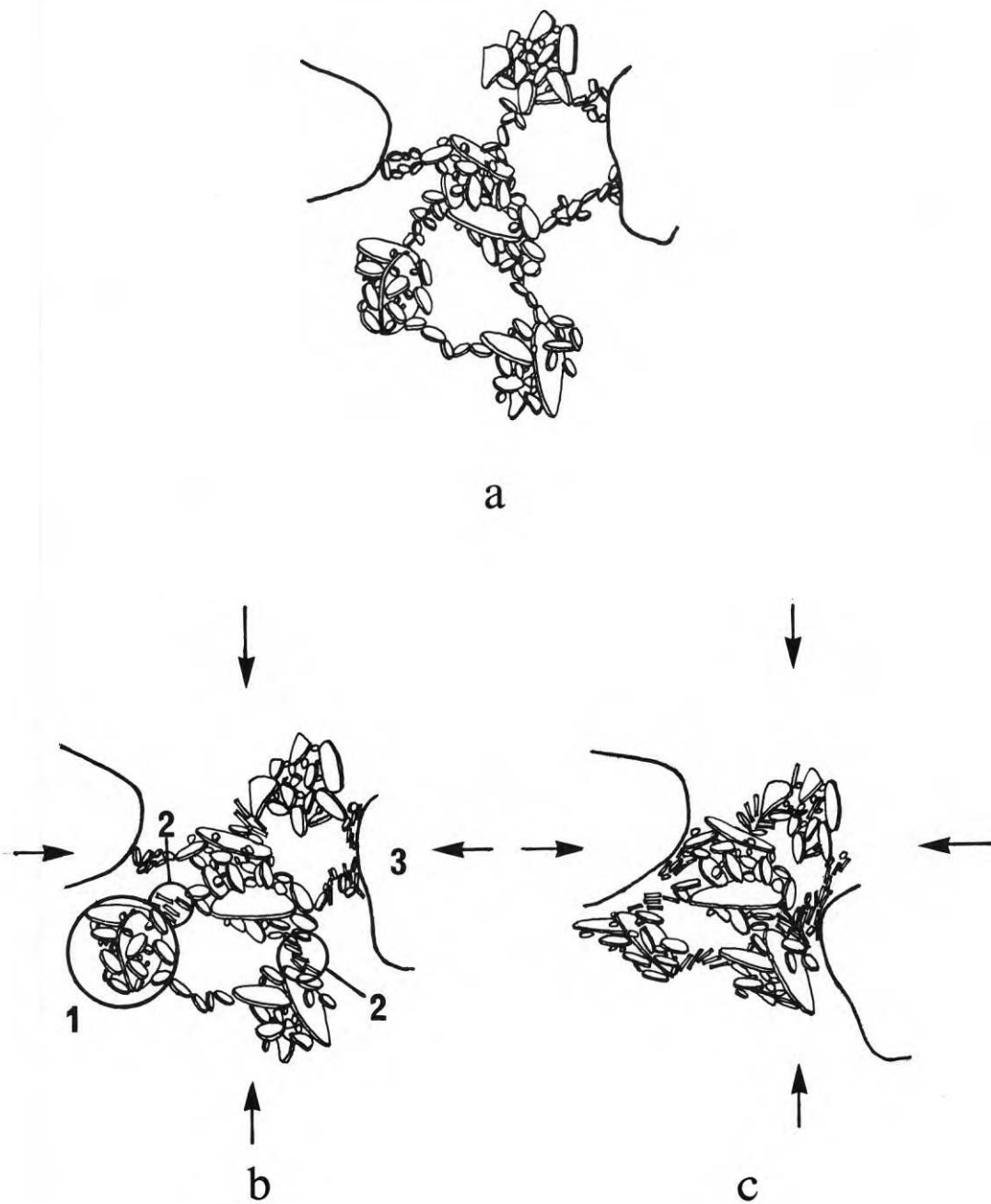


FIG. 8. Domänbildning i aggregerad lera. a) Löst tillstånd före sammanpressning. b) Första stadiet vid domänbildning orsakad av treaxligt tryck. c) Stora svängda domäner bildas under ökat tryck. 1 anger aggregat, 2 domän och 3 mjälakorn.

Domain formation in aggregated clay. a) Uncompact soft state. b) Initial stage of domain formation due to triaxial pressure. c) Large curved domains caused by increased pressure. 1 denotes aggregate, 2 domain and 3 silt grain.

R13:1971

**Denna rapport avser anslag nr C 439:4 från Statens råd för
byggnadsforskning till Institutionen för geoteknik och grundläggning,
CTH, Göteborg**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84, Stockholm
Abonnemangsgrupp: k (konstruktion)**

Pris: 9 kronor