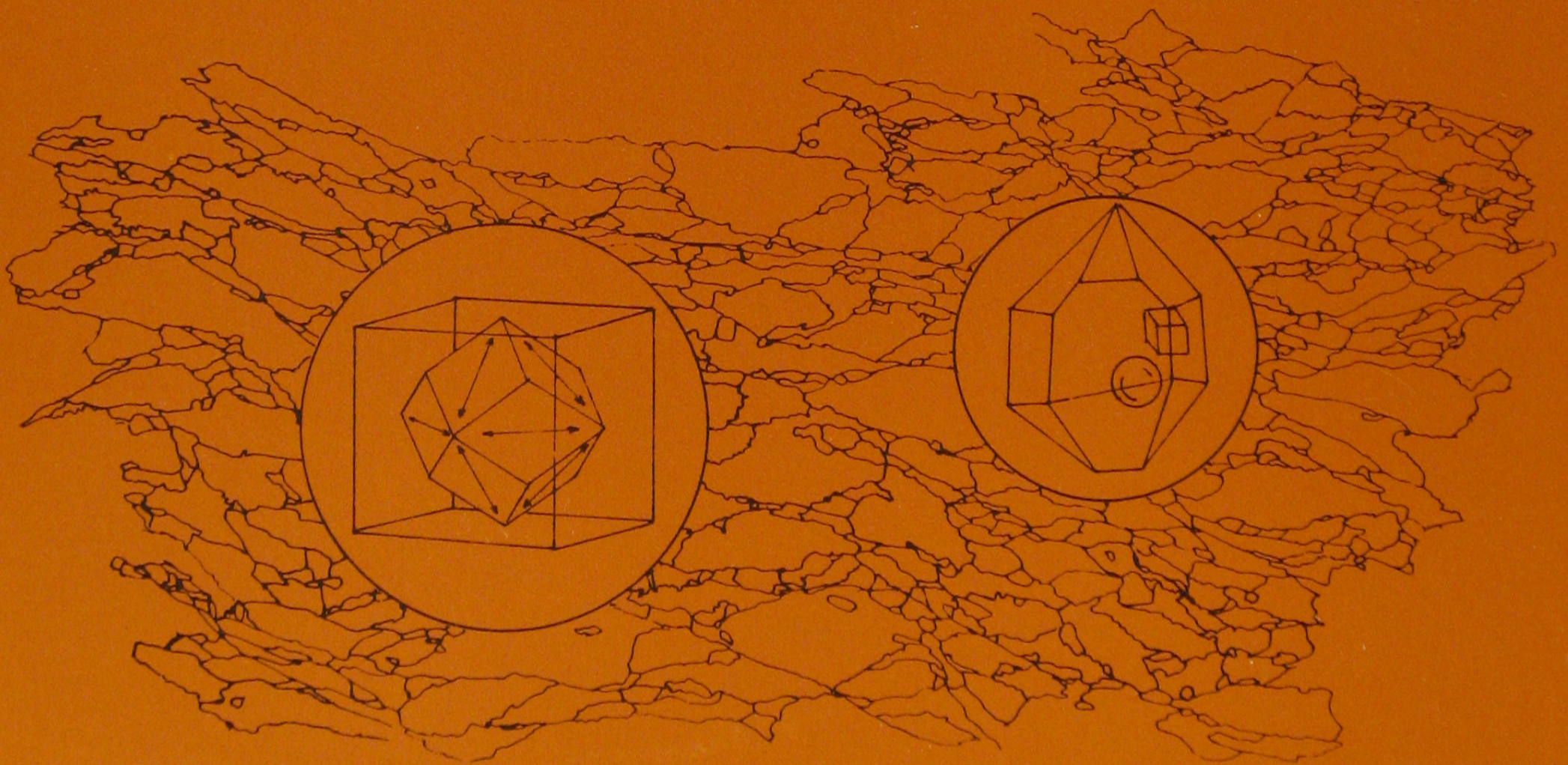


ZECHSTEIN SALT
DENMARK
Salt Research
Project EFP-81

Volume I
Sammendrag af Saltforsknings-
projekt EFP-81
(English Summary)



DGU

Geological Survey of Denmark

1984

ZECHSTEIN SALT DENMARK Salt Research Project EFP-81

Volume I
Sammendrag af Saltforskningsprojekt EFP-81
(English Summary)

Af Fritz Lyngsie Jacobsen, Martin Sønderholm,
Niels Springer, Jørgen Gutzon Larsen,
Per Lagoni og Johannes Fabricius

Redaktion: Johannes Fabricius

August 1984

DGU- series C. no. 1·1984

ISBN 87 88640 08 6 (bd. 1-4)

DGU

Geological Survey of Denmark

FORORD

Saltforskningsprojektet under Energiministeriets "Energiforskningsprogram 81" blev institueret i Danmarks Geologiske Undersøgelser regie ved Energiministeriets skrivelse J.nr. 221-80 af 23. april 1981.

Det var projektets opgave at fremskaffe et grundigt indblik i danske saltdomers indre struktur, mineralogiske sammensætning og saltbjergarternes egenskaber.

Projektet omfattede strukturel analyse af saltdomerne samt specielle undersøgelser af saltet fra en række borer, her under mikrostrukturanalyse, petrografi, mikrotermometri, mineralogi og metamorfose.

Projektet blev påbegyndt 1. juli 1981 og afsluttet med rapportering 31. december 1983.

De tildelte bevillinger - 1.4 millioner kroner - er anvendt dels til aflønning af projektansatte medarbejdere og dels til drift af tilknyttede laboratorier samt fremmede tjenesteydelser. Budgettet balancerer ved projektperiodens udløb.

Den daglige ledelse af projektet blev i hele perioden forestået af geolog Johannes Fabricius. Øvrigt personel tilknyttet projektet var geolog Jørgen Gutzon Larsen fra 1/7 1981 til 30/6 1983, geolog Niels Springer fra 21/3 1983 til 30/6 1983. Geolog Fritz Lyngsie Jacobsen har været repræsentant for DGU under hele projektforsløbet.

Lic. tech. Per Lagoni, LICconsult, har for Energi-styrelsen i tilknytning til saltforskningsprojektet udført en statistisk analyse.

Endvidere har geologistuderende Martin Sønderholm, laborant Marga Jensen og laborant Gert Grønning været tilknyttet projektet. Sekretær Hanne Nylander har ydet sekretærhjælp.

DGU har leveret serviceydelser fra fotolaboratorium, tegnestue og EDB sektion.

Litteraturliste er ikke medtaget i Vol. I. Der henvises til REFERENCES i Vol. II-IV.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	3
HISTORISK OVERSIGT. Fritz Lyngsie Jacobsen.	7
KAPITEL 1.	11
1. LITHOSTRATIGRAFI AF DE DANSKE ZECHSTEINSALTE I DET NORSK-DANSKE BASSIN. Fritz Lyngsie Jacobsen.	13
2. BESKRIVELSE AF OVERGANGSZONEN ZECHSTEIN 1 - ZECHSTEIN 2 I BATUM 13. Martin Sønderholm.	30
3. GEOKEMISK UNDERSØGELSE AF ZECHSTEIN SALT OG ANHYDRIT FRA BATUM DOMEN. Niels Springer.	34
KAPITEL 2.	37
1. STENSALTETS TEXTURELLE OPBYGNING. Jørgen Gutzon Larsen.	39
2. STATISTISK ANALYSE AF STENSALTS MEKANISKE EGENSKABER. Per Lagoni.	52
KAPITEL 3.	63
1. MIKROTERMOMETRISKE UNDERSØGELSER AF HALIT OG KVARTSKRYSTALLER FRA SALTDOMER I JYLLAND. Johannes Fabricius.	65
2. NATURLIG CARNALLITS TERMALE STABILITET I COGNATE GEOLOGISKE MILJØER. Johannes Fabricius.	77
3. FREMTIDIGE ARBEJDER	81
ENGLISH SUMMARY	83

HISTORISK OVERSIGT

Den geologiske undersøgelse af det Norsk-Danske bassin begyndte i det små med udførelse af geofysiske undersøgelser i slutningen af trediverne. Krigen afbrød imidlertid undersøgelseerne.

Efter krigen blev undersøgelserne genoptaget af DAPCo (Danish American Prospecting Co) samtidig med, at en borekampagne blev sat i gang i det danske salthorstområde. I perioden 1946-1952, hvor DAPCo også borede i andre dele af Danmark, blev der foretaget 56 boringer på saltstrukturer, af hvilke de 34 sluttede i salt.

Nord for Ringkøbing-Fyn højderyggen, der danner den sydlige begrænsning af det Norsk-Danske bassin, bores Slagelse 1. Denne boring er den eneste i denne kampagne, der gennemtrænger Zechsteinsaltet i bassinet.

Erhvervsinteresser var ved at gøre sig gældende, og i årene 1958-1959 borede Cheminova 2 boringer i Harboøre salthorst til brine produktion til eget brug.

I 1959 afgav Saltudvalget betænkning. Som et resultat af denne blev Boreudvalget nedsat med den opgave at forestå en kaliefterforskning i Suldrup salthorst. 4 boringer blev udført i årene 1959-1961 men med et efterforskningsmæssigt negativt resultat. Kaliindholdet var for lille til en rentabel minedrift.

Andre var begyndt at se på udnyttelse af det rene salt og i 1964 borede Dansk Salt I/S i Hvornum salthorst 2 boringer til produktion af stensalt ved udskylning. I 1966 startedes indvindingen af inddampningssalt på fabrikken ved Mariager med en årlig produktion på 300.000 tons. Denne årsproduktion er siden blevet fordoblet og 2 nye produktionsboringer, som bores i 1971 og 1978, er igangsat.

Det var ikke kun ved saltefterforskning, der

fremskaffedes oplysninger om saltet. Da DUC (Dansk Undergrunds Consortium) i 1963 genoptog efterforskningen efter gas og olie i Danmark fremkom helt nye oplysninger om det Norsk-Danske bassin både ved de geofysiske målinger og ved den fornyede boreaktivitet. Specielt gav 3 nye boringer mange oplysninger om de danske Zechsteinsalte, her nævnt fra øst: Rønde 1, C-1 og D-1. De to sidst nævnte boret i Nordsøen.

Interessen for anvendelse af de danske salthorste var stigende og i 1972-1973 foretog ELSAM en undersøgelse af muligheden af at bygge et luftmagasinkraftværk i forbindelse med udskylning af luftmagasinkaverne i Vejrum salthorst. I forbindelse med undersøgelsen blev der både udført en seismisk opmåling og boret 3 boringer, Vejrum 7, 8 og 9.

Men anden anvendelse af salthorstene kom også på tale. I 1976 afgav en arbejdsgruppe nedsat af Atomenergikommisionen efter ønske fra Folketingets udvalg vedrørende videnskabelig forskning en rapport: "Geologisk deponering i Danmark af højaktivt affald fra kernekraftværker", i hvilken følgende konklusioner blev draget: Foruden stensalt blev krystalliske bjergarter og ældre tertiære lerarter anset for egnede til deponering af højaktivt radioaktivt affald. Udvalget skønnede dog, at det var mest hensigtsmæssigt at undersøge de ældre tertiære lerarter først som den billigste mulighed.

Også anden anvendelse af saltet blev undersøgt. I 1978 fremkom rapporten om opbevaring af gas og olie i kaverne i danske salthorste fra D.O.N.G. A/S (Dansk Olie og Naturgas A/S) og fra Dansk Salt I/S. I forlængelse af denne rapport begyndte D.O.N.G. A/S at bore forundersøgelingsboringer i Tostrup salthorst. 2 boringer (Tostrup 3 og 4) blev boret, hvorefter man gik over til at bore egentlige kaverneboringer (Tostrup 5, 6, 7, 8, 9 og 10) i årene 1980-1981. I 1983 påbegyndtes udskylningen af de første kaverne til gasopbevaring. Opbevaring af olie i kaverne er indtil videre stillet i bero.

I 1978 fremkom yderligere en rapport vedrørende anvendelse af de danske stensalte. De to elektricitetskraftværkssammenslutninger ELKRAFT og ELSAM udsendte en rapport om deponering af højaktivt affald fra danske kernekraftværker. I denne fase 1 rapport peges på, at deponering sandsynligvis kan finde sted i en dansk salthorst.

Efter et samråd mellem elværkerne og regeringen blev det besluttet, at elværkerne skulle foretage en fase 2 undersøgelse. Elværkerne foretog geofysiske målinger og borede Linde 1, Erslev 1 og 2, de to sidstnævnte i Mors salthorst. Resultaterne af denne undersøgelse forelå i 1981 og konkluderede, at en sikker deponering af højaktivt affald er mulig i 8 dybe borehuller eller i en mine i rent stensalt med spredt anhydrit og mindre end 0,1% vand.

Denne rapport er vurderet af Miljøstyrelsen, som fremkom med deres konklusion i 1984: "Resultaterne fra undersøgelserne viser, at der i Morshorsten findes salt, der er egnet til deponering, men de foretagne undersøgelser giver ikke grundlag for at fastslå, i hvor stort et område denne saltkvalitet er til stede."

KAPITEL 1

1. LITHOSTRATIGRAFI AF DE DANSKE ZECHSTEINSALTE I DET NORSK-DANSKE BASSIN

Af Fritz Lyngsie Jacobsen

2. BESKRIVELSE AF OVERGANGSZONEN ZECHSTEIN 1 - ZECHSTEIN 2 I BATUM 13

Af Martin Sønderholm

3. GEOKEMISK UNDERSØGELSE AF ZECHSTEIN SALT OG ANHYDRIT FRA BATUM DOMEN

Af Niels Springer

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. LITHOSTRATIGRAFI AF DE DANSKE ZECHSTEINSALTE I DET NORSK-DANSKE BASSIN. Fritz Lyngsie Jacobsen.	13
Træk af den strukturelle opbygning	13
Beskrivelse af Zechsteingruppens bjergarter	15
Præ-Zechstein	15
Zechstein 1	16
Zechstein 2	18
Zechstein 3	20
Zechstein 4	20
Buntsandstein	21
Aflejringshistorie	21
Saltbevægelser	23
Cap rock	25
Boreerfaringer	26
Zechsteinsaltet som råstof	27
2. BESKRIVELSE AF OVERGANGSZONEN ZECHSTEIN 1 - ZECHSTEIN 2 I BATUM 13. Martin Sønderholm.	30
3. GEOKEMISK UNDERSØGELSE AF ZECHSTEIN SALT OG ANHYDRIT FRA BATUM DOMEN. Niels Springer.	34
Indledning	34
Metoder og resultater.	34

KAPITEL 1

1. LITHOSTRATIGRAFI AF DE DANSKE ZECHSTEINSALTE I DET NORSK-DANSKE BASSIN

Træk af den strukturelle opbygning

Det Norsk-Danske bassin er mod nord, nordøst og øst afgrænset af det Fennoskandiske skjold, mod syd af Ringkøbing-Fyn højderyggen og med åbning mod vest. Det strukturelle mønster, som det fremtræder i dag, er et resultat af den forudgående tektoniske udvikling i området: den kaledoniske foldning mod vest, den hercyniske foldestrøg mod syd og den efterfølgende vulkanisme i områdets nordlige del der i dag kendes som Oslo provinsen. Denne vulkanisme fandt sted i Nedre Perm, Rotliegendes og var optakten til den kraftige indsynkning, som fandt sted i området.

Dannelsen af det Norsk-Danske bassin var kun en del af et meget større tektonisk hændelsesforløb: anlæggelsen af det store riftsystem, der senere blev til Atlanterhavet. En arm af denne rift zone mellem Skandinavien og Skotland åbnede sig så meget, at den skabte havforbindelse fra nord til indsynkningsområdet, som ikke blot omfattede det Norsk-Danske bassin men også Nordsøen, Nordtyskland, det sydlige Danmark og store dele af Polen.

Dannelsen af dette hav skete i begyndelsen af Zechstein. Havforbindelsen var periodevis åben og lukket og dette i forbindelse med et tørt klima skabte muligheden for en kraftig inddampning og udfældning af de saltminerale, der danner de store Zechsteinaflejringer i Nordeuropa.

Indsynkningen af området fortsætter i de efterfølgende perioder frem til nutiden og er fortsat aktiv. I perioden efter Zechstein, Trias, aflejredes ørkensedimenter i form af røde, rødbrune, brune og grå sand, silt og ler bjergarter. To veludviklede sten-

saltlag findes i den øvre del. I den yngste del af Trias var indsynkningen hurtigere end tilførselen af sedimentmateriale med det resultat, at havet på ny trængte ind over området. Den lagserie, som nu opbygges, består af mørke lerskifre med silt og finsandslag i de kystnære områder. Havdybden og dermed sedimenttypen veksler gennem Jura og Nedre Kridt med i grove træk den samme sedimentationsfølge.

Ved overgangen til Øvre Kridt sker en markant ændring i sedimentationen, idet der sker en klimaændring til et tørt og varmt klima med en kraftig sedimentation af kalk.

I løbet af kridtperioden og fortsættende i den næste periode, Tertiær, har området med den kraftigste indsynkning flyttet sig mod sydvest til den centrale del af Nordsøen. Dette præger selvsagt de tertiære sedimenter i det Norsk-Danske bassin, hvor der sker en ændring fra fede lere i ældre Tertiær til sandede aflejringer i det yngste Tertiær. De alleryngste lag, som aflejres, er de glaciære kvartære lag i forbindelse med de store nedisninger.

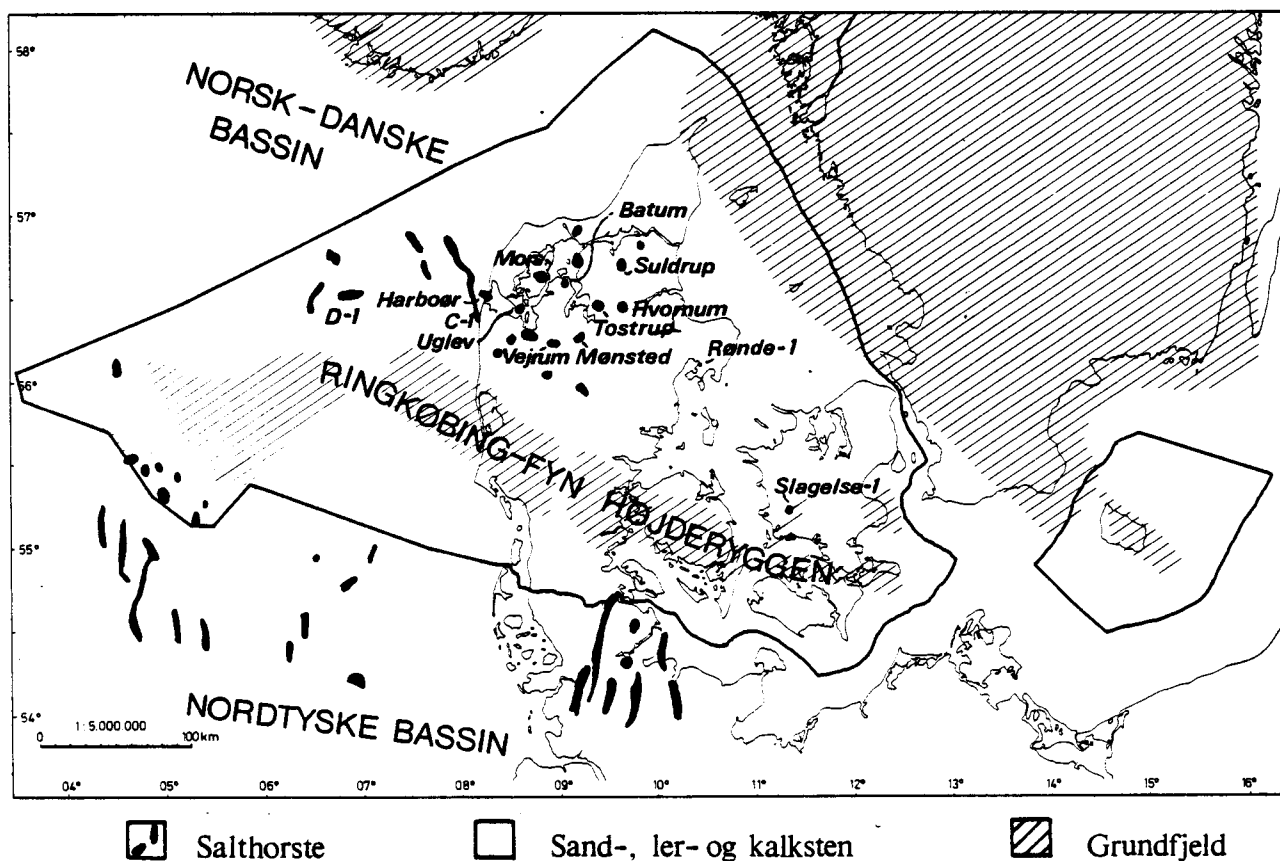
Den samlede tykkelse af sedimenter fra perioderne efter Zechstein er på over 6000 m i salthorstregionen i Nordjylland.

Beskrivelse af Zechsteingruppens bjergarter

I skemaform er angivet materialet, som anvendes ved denne beskrivelse. Gennemgangen af de tilgængelige data foretages fra vest (skema 1). Den vestligste boring, som gennemtrænger Zechstein, er D-1 ca. 160 km vest for Thyborøn, den efterfølgende C-1 ca 30 km vest for Thyborøn og salthorst området, som beskrives under et, Rønde 1 på Djursland og Slagelse 1 på Sjælland. Placeringerne er angivet på oversigtskortet (fig. 1).

Præ-Zechstein.

De aflejringer, der er observeret umiddelbart under saltaflejringerne, antages alle at være Rotliegendes



Oversigtskort med angivelse af det Norsk-Danske bassin og det Nordtyske bassin som delbassiner af det nord-europæiske Zechstein bassin. De anførte navne er på de anforede salthorste og for de anvendte borer.

alder. Sedimenterne er rødbrune til brune sandsten, silt- og lerholdige og silt-lersten. I C-1 er truffet en vulkanit, der er aldersbestemt til Rotliegendes ved K/Ar-metoden.

Zechstein 1.

I normale inddampningssekvenser ses en bestemt følge af de fundne bjergarter: ældst ler, derefter karbonater,

Formations inddeling	D-1	C-1	Salthorst området	Rønde 1	Slagelse 1	
Z4	Na4	0	0	20?	11	0
	T4	20?	2?	50 - 60	15	0
Z3	Na3	34	109	ca 100	61	10
	T3	24	16	15 60	25	11
Z2	Na2r	162?	18	30 15	5	4
	K2	42	43	10 - 15	7	9
	Na2(k)	84	20	ca 20	3	24
	Na2	1124	264	ca 600	55	90
	A2					
	Ca2	159	66	15	23	37
Z1	Alr					
	K1	3	0	0	0	0
	Na1	99	31	ca 400	0	137
	A1	2	36		0	5
	Ca1	35	28		22	49
	T1	1.5	1		1	?

Skema 1. Oversigtsprofil af formations inddeling af Zechstein-gruppens bjergarter i det Norsk-Danske bassin. Tykkelsen af de enkelte formationsenheder er angivet for hver af de udførte boringer medens der for salthorstområdet er angivet den skønnede oprindelige tykkelse af saltet. Den tyske Zechsteininddeling er benyttet. Z = Zechstein, T = saltler, Ca = karbonat, A = anhydrit, Na = stensalt, K = kalisalt, k = kaliholdig og r = residual. I salthorstområdet er angivet en tykkelse for den vestligste del og for den østligste del af Na2r og T3 ved overgangen fra Z2 til Z3. Alle mål er angivet i m.

sulfater, klorider og med K- og Mg-holdige salte som afslutning. Denne succession findes også i det Norsk-Danske bassin. Som ældste bjergart træffes en 1 m tyk sort bitumenrig skifer, som er velkendt over hele bassinet også i nordtyske del, kendt under navnet Kupferschiefer. Denne overlejres af en kalksten, som igen overlejres af en dolomit med et varierende indhold af anhydrit. Disse karbonater har et varierende lerindhold og er mørkbrunt til brunt farvet. I D-1 er der i dette afsnit fundet små mængder olie. Over karbonaterne træffes sulfaterne, der er udviklet som finkornede, hvide til grå anhydritbjergarter. I C-1 er de særligt veludviklet, formentlig som en randfaciesaflejrings ved Ringkøbing-Fyn højderyggen. De mangler i Rønde 1 og er tynde i D-1 og Slagelse 1.

Den nuværende viden om de ældste evaporiter stammer alle fra området uden for salthorst provinsen. Ingen boringer er trængt gennem her og intet af de ældste bjergarter er fulgt med saltene op i horstene. Dette forhold ændres med kloriderne, stensaltet. Det er blevet mobiliseret og presset op sammen med de yngre salte i salthorstene.

Dette salt er nu, takket være det store antal kerner, der er taget i salthorstområdet, med til at danne grundlag for en forståelse af den ældste del af Zechstein. Tykkelsen anses for at være ca. 400 m i horstområdet.

Stensaltene er grå til lysegrå, mere eller mindre gennemskinnelige, mellem- til grovkornede, ofte med en meget kraftig foliation udviklet. Disse er, sammen med de tilsvarende salte fra Zechstein 2, blevet nøje undersøgt for at få en bedre forståelse af hvilke geologiske forhold, der har indflydelse på deres styrke og stabilitet i forbindelse med en praktisk anvendelse. Resultaterne af denne undersøgelse er gengivet i kapitel 2.

Disse salte er også truffet i boringerne uden for salthorstprovinsen men med mindre tykkelse og giver supplerende oplysninger om de geologiske forhold. De ældste dele af Z1-stensaltene er anhydritrige og navnlig

i C-1 ses dette meget tydeligt og bestyrker indtrykket af, at det er en randfacies aflejring, der er truffet i denne boring. I Rønde 1 er der ikke aflejret stensalt. Zechstein 1 stensaltet benævnes Na1 eller Werra-stensalt efter tysk terminologi.

Kalisalte er kun truffet i D-1, som 2 mindre mineralisationer i midten af stensaltsekvensen og som en 3. kraftig mineralisation i slutning af Zechstein 1. Alle 3 er erkendt ved logtolkning.

Zechstein 2.

Den anden cyklus indledes med en meget markant bjergartssekvens, som er nøjere beskrevet i slutningen af dette kapitel af Martin Sønderholm. Den er beskrevet under forskellige navne, anhydrit - dolomitzonen eller overgangszonen Z1/Z2. Zonen er meget markant, har næsten ens tykkelse over hele bassinet og et logbillede, som er let genkendeligt. Det ældste led af zonen består af en 1/2 til 1 m tyk massiv anhydritbænk, der er dannet ved opløsning af det ældste salt under havindbrudet i begyndelsen af Zechstein 2. Denne bænk efterfølges af en brunsort gas- og brineholdig lerskifer, mørke kalksten, brune dolomiter (Anhydritknotenschiefer), anhydrit-dolomit-bjergart (Wolkenanhydrit), brune dolomitskifre for at slutte med en sliret anhydrit (Flaseranhydrit). Navnene i parenteserne er de tyske bjergværksnavne. Det er fra denne formation, at den kulbrintegas, der har givet gasudbrud under boring, stammer. Ligesåvel kan en del af brinen i saltene forventes at stamme fra denne del af zonen.

Overgangszonen overlejres af grå til lysegrå til farveløse stensalte, som i det danske salthorstområde er gennemboret i mange boringer. Dette salt er meget vanskeligt at kende fra det ældste grå Z1 stensalt, ligesom dets geologisk-tekniske egenskaber var dårligt kendte. I forbindelse med energiforskningsprojektet EFP-81 blev det sat som mål at undersøge disse forhold.

Danske sammendrag af disse undersøgelser findes, som kapitlerne 2 og 3 i denne afhandling, ligesom en undersøgelse af sporstoffernes fordeling findes i slutningen af dette kapitel.

Disse grå salte er de mest udbredte stensalte i det nordvestlige Europa og udgør store sammenhængende aflejringer fra Viking Graben i nord, Storbritannien og Holland i vest, Harz-området og Karpaterne i syd og øst til den skandinaviske randzone mod nordøst og nord. Det benævnes Na₂ eller Stassfurt-stensaltet efter tysk terminologi.

Saltene er, som det også fremgår af det sammenstillede profil, truffet i de her nævnte danske boringer. Ligesom i Z1 adskiller Z2 saltfølgen sig også i boring D-1, hvor der er observeret 2 kalimineraliseringer i den ellers rene stensaltfase. Det kan ikke afgøres, om disse er oprindelige eller sekundært dannet.

Zechstein 2 afsluttes med en totalinddampning af dette store salthav. Havet bliver mere og mere lavvandet og der udfældes iltede rødbrune salte. Disse er karakteriseret ved et lille indhold af kalimineraler og er ca. 20-30 meter tykke. Saltene efterfølges af den egentlige kalizone, der kaldes Veggerbyzonen i salthorstområdet og som svarer til den tyske Stassfurt kalizone. Veggerbyzonen er hvid, grå og sortgrå farvet og lagdelt med de enkelte lag fra 1 til 10 cm tykke. De hvide lag er kieseritrige (MgSO₄·H₂O), medens de grå består af stensalt, sylvin (KCl), spredt carnallit (KCl·MgCl₂·6H₂O) og små mængder ler.

Kalizonen er tredelt. Den nedre del består overvejende af grå salte, den mellemste af hvide salte og den øvre af sortgrå og hvide. Forekomsten af kali er navnlig knyttet til den mellemste og den nedre del af den øverste del. Den samlede tykkelse er ca. 10-15 m. I denne sammenhæng indtager D-1 også en særstilling, idet der er gennemboret 204 m. Kalizonen er formodentlig koncentreret i forbindelse med pudedannelsen.

Over Veggerby kalizone aflejredes det såkaldte dækstensalt, der er en 5 til ca. 30 m tyk aflejring af svagt orange til rødbrune til sortbrune stensalte med et varierende men generelt stigende indhold af ler og silt mod toppen af laget. Med dette salt afsluttedes Zechstein 2.

Zechstein 3.

Den sekvens, som indleder Z3 og som allerede var varslet i Z2 med et gradvist tiltagende ler-silt-indhold i saltet, er i almindelighed en ca. 10-25 m tyk aflejring af ler- og siltsten med enkelte mere finsandede lag. I den østlige del af salthorstområdet er saltleraflejringen ca. 60 m tyk. En del af disse bjergarter er krydsaflejrede, rødligt farvede sedimente og er lokalt koncentreret hvor sedimenttilførselen har været rigelig. Saltlerserien afsluttes med en tynd dolomitaflejring på få cm og med en 10-50 cm tyk sortgrå anhydrit.

Stensaltaflejringerne i Z3 er komplekse og består af overvejende farvede salte, som varierer fra grålige til farveløse til gullige til orange til rødbrune og til blodrøde, alle med en mere eller mindre tydelig bånding. Adskillige anhydritlag, ca. 1/2 m tykke, er observeret med og uden kalimineralisering. To kalizoner, Suldrup og Højris, er observeret i denne saltsekvens. Farven på disse salte, som skyldes iltede jernforbindelser, viser, at udfældningen har fundet sted på relativt lavt vand. Zechstein 3 stensaltet benævnes Na₃ eller Leine-stensaltet efter tysk terminologi.

Zechstein 4.

Denne yngste Zechsteinsekvens indledes med en sedimentation af silt- og lersten, olivenbrune til olivengrå til gråsort farvede. Denne serie indeholder stedvis et sort anhydritlag i midten og er kendt fra salthorstområdet. I Rønde 1 er denne aflejring rødbrun. Stensaltene, som overlejrer ler-silt-serien, er dårligt

Dybde til cap rock	Dybde til salt	Antal boringer til salt	Antal m boret i salt	Omtrentlig størrelse i km	
Batum	158	206	14	2323	10,5 x 5
Harboøre	82	166	2	775	10 x ?
Hvornum	192	294	5	5049	3,5 x 3,5
Mors	582	608	2	5542	10,5 x 10
Mønsted	213	317	1	445	5,5 x 5
Suldrup	103	200	15	10003	11 x 6
Tostrup	145	236	10	11296	5,5 x 5,5
Uglev	964	973	1	274	9 x 6,5
Vejrum	174	226	6	2574	11 x 5,5

Skema 2. 9 salthorste beliggende i den nordjyske salthorst-provins er blevet anboret: perioden 1946 - 1983. Resultaterne af disse borekammerer er sammenstillet med angivelse af den mindste borede dybde til cap rock og til salt. Antallet af boringer, der er afsluttet i salt er angivet med det samlede antal meter, der er boret i salt i hver enkelt horst. Endelig er de enkelte horstes omtrentlige areal angivet.

kendt. De er lyse grålige til lyse rødlig orange salte med tynde lag af ler og lerholdigt salt.

Buntsandstein.

Ingen yngre dele af Zechstein kan identificeres, og det antages, at bassinet er fyldt op på dette tidspunkt. De efterfølgende sedimenter, som aflejres over havniveau, består af rødbrune, brune, grønne og grålige ler-siltsten med et varierende mindre karbonatindhold. Disse sedimenter er ørkenprægede aflejringer og er et udtryk for, at det tørre klima fortsatte i Buntsandstein.

Aflejringshistorie

I afsnittene "Træk af den strukturelle opbygning" og

"Beskrivelse af Zechsteingruppen" er givet spredte oplysninger, som samles til et hele i det efterfølgende.

Det Norsk-Danske bassin er en del af det store Zechstein bassin, der dækkede store dele af Nordvesteuropa og med tilløb fra det åbne hav i området mellem Skandinavien og Skotland. Efter den forudgående kraftige vulkanisme i Rotliegendes begyndte en kraftig indsynkning af bassinet. Havet skyllede ind i bassinet og den første mørke skifer, Kupferschieferen, blev aflejret. Straks efter begyndte inddampningen i hele Zechsteinbassinet med aflejring af kalksten, dolomit og anhydrit.

Inddampningen blev kraftigere i nogle områder end i andre. I syd fik Werrabassinet sin egen udvikling, i øst det Polske bassin og i nord det Norsk-Danske bassin. Det sidstnævnte var adskilt fra hovedbassinet af Ringkøbing-Fyn højderyggen, der dannede en lang ø eller ørække. Indsynkningshastigheden var høj, som saltene også bærer præg af ved at være aflejret under ikke-iltende forhold, dvs. relativt dybt vand. Aflejringen af Z1 afsluttedes med kaliudfældning i området ved boring D-1. Denne kan have haft en større udstrækning men blev opløst under det efterfølgende havindbrud.

Denne nye oversvømmelse skyllede ind over de store saltaflejringer, opløste kloriderne og efterlod anhydrit som et dække over hele havbunden. Umiddelbart efter fulgte en aflejring af mørke skifre med højt organisk indhold, som kan stamme fra det indstrømmende havvand. Aflejringens mønstret fra Z1 gentages og der aflejres kalksten, dolomit og anhydrit i en typisk sekvens, som kan genkendes over hele bassinet, også i de norske boringer.

En stensaltserie, som i høj grad ligner Z1-stensaltet, bliver nu aflejret i det Norsk-Danske bassin. Det er grå salte og formentligt sker aflejringen under stort set de samme betingelser. Mod slutningen af Zechstein 2 bliver saltene renere og skifter farve til farveløse og senere rødbrune salttyper.

Disse sidste er aflejret under iltende forhold, dvs. i relativt lavvandede områder. De er kaliholdige og danner begyndelsen til den næsten fuldstændige inddampning, som har fundet sted over hele Zechstein bassinet. I den følgende tid forekommer en del mindre oversvømmelser, og der aflejres en del leret stensalt.

Det er fortsat meget lavvandet i det Norsk-Danske bassin ved begyndelsen til Zechstein 3, hvor der aflejres ler- og siltsten. Indsynkningen i området fortsætter og det overskylles igen og en fornyet inddampning finder sted med aflejring af iltede typer salte. Der er tegn på, at bassinet er ved at være fyldt.

Indsynkningen i det Norsk-Danske bassin er mindre i de østlige dele, ligesom randområderne viser en langsommere indsynkningstakt end det centrale salthorstområde. Det er da også i dette område, at Zechstein 4 ler- og siltsten foruden stensalt er aflejret. Med denne cyklus slutter Zechstein i denne del af bassinet, men indsynkningen fortsætter i den efterfølgende periode, Trias, begyndende med Buntsandstein aflejringer.

Saltbevægelser

Både i og uden for salthorstområdet har saltet været udsat for bevægelser. Disse bevægelser, halokinesis, er det synlige udtryk for, at der er en geologisk ustabilitet, der søges mindsket ved, at det lettere salt bytter plads med de overliggende tungere sedimentter.

Salt vil, når det bliver udsat for stigende tryk og temperatur, hvilket sker når det under indsynkningen kommer dybere og dybere ned i bassinet, blive mere og mere plastisk, ja, endog visko-plastisk og viskøst og have større evne til at bevæge sig. Det kan være en forkastning i underlaget, en aflejringsvekslen i de overliggende lag eller forskelligheder i saltaflejringerne selv, der udløser bevægelsen. Hvad

årsagen end er, vil der først dannes en saltpude, dvs. en stor ophvælvning af salt. Den vil typisk blive dannet, når der er 2-3000 m overliggende sedimentter.

Dette saltpude-stadium vil gå over i diapirstadiet, der er det geologiske navn for salthorstdannelsen. Saltbevægelsen er størst i denne periode og der sker en opbrydning af de overliggende lag og et gennembrud af saltet til et niveau, hvor en opløsning finder sted. Efter diapirstadiet aftager bevægelsen, men den vil fortsætte i langsommere tempo, indtil der er opnået ligevægt i området, måske først når saltet er endeligt presset igennem de overliggende lag.

Den danske salthorst Tostrup er velundersøgt både seismisk og gravimetrisk, medens en serie: Batum, Mors, Suldrup og Vejrum er undersøgt i den udstrækning, det geofysiske materiale tillod. Det er dog muligt at se flere generelle træk i udviklingen. Saltflydningen til puden eller diapiren er sket fra forskellige områder til forskellig tid. Pudedannelse synes i almindelighed at have fundet sted i Mellem til Øvre Trias, medens diapirdannelsen i almindelighed har fundet sted i Jura og Nedre Kridt.

Det er i dag vanskeligt at afgøre saltets egentlige opskydningshastighed. Bedømt ud fra de indre ofte meget komplicerede strukturer er det klart, at saltet har forskellige hastigheder i horsten. Det er en almindelig iagttagelse, at det ældste Zechstein 1 salt har overhalet både Zechstein 2 og 3 salte under opskydningen. Saltoverfladen er et resultat af en balance mellem opskydningen og opløsningen af saltet. Såfremt dette niveau er konstant, er det et udtryk for, at disse processer afbalancerer hinanden.

Men det er ikke de eneste processer, der påvirker overfladen over en salthorst i dag. Der kan opstå niveau- forandringer af andre årsager: hydrering og dehydrering af systemet anhydrit-gips, eftervirkning efter nedisning, hvor permafrosten har været dybere uden

	Batum	Harboøre	Hvornum	Mors	Mønsted	Suldrup	Tostrup	Uglev	Vejrum
Antal boringer i cap rock (ialt)	19	3	6	2	1	15	10	I	6
Dækbjergarter	K	K	TK	K	K	K + TK	K	J	K + TK
Dybde til cap rock i m	158	82	192	582	213	103	145	964	174
<hr/>									
min.	33	83	48	20		7	33		0
Tykkelse af cap rock gennemsnit	45	108	72	23	104	71	62	29	18
max.	58	132	115	26		114	99		66
<hr/>									
Mineralselskab i cap rock	A + G	A + G	A + G	A	A + G	A + G	A + G	A	A + G
Antal "lost circulation"	5		4			5	1		2

Skema 3. Sammenstilling af oplysninger om de danske salthorstes dækbjergarter og cap rocks. De kvartære aflejringer er kun medtaget når de udgør en væsentlig del af dækbjergarterne. J = jurasiske lersten, K = kalk og kalksten og TK = tertiært og kvartært sand og ler. Sammenstilling af de enkelte salthorstes cap rock tykkelser er angivet med en oversigt af deres mineralselskab og med en angivelse af antallet af "lost circulation" i cap rock under borearbejdet. A = anhydrit og G = gips.

for salthorsten og der generelt har været tørt over saltet. Påvirkninger, der stadig er under udligning og som er med til at præge overfladen og de relative bevægelser over salthorsten.

Cap rock

Denne residualbjergart dannes af de tungtopløselige bestanddele i saltet, når det kommer i berøring med det mobile umættede vand. De danske cap rock bjergarter består af anhydrit, som i varierende grad er omdannet til gips og med mindre mængder dolomit, ler og silt.

Ingen af de danske cap rocks er godt undersøgte. De udførte undersøgelser giver dog en mulighed for at give en oversigtsbeskrivelse og dermed en bedre forståelse af forholdene. Oplysningerne er samlet i skema 3 og det kan generelt siges, at kendskabet er størst hvor flest boringer gennemtrænger cap rock. Ud fra tykkelsen af cap rock, kendskab til dens bestanddele og et skønnet mål over mængden af uopløst materiale fra det opløste salt

kan en skønsmæssig beregning af opløst salt foretages. I denne sammenhæng må det erindres, at en mættet saltopløsning også opløser en del anhydrit.

Den brine, der er resultatet af denne opløsning, kan være årsag til en del rekrySTALLISATION og andre diagenetiske forandringer i de overliggende sedimentter. F.eks. opløsning og senere genudfældning af sedimentbestanddele, dolomitisering af kalk af en Mg-rig brine, hærDning af kalk ved rekrySTALLISATION m.v. Alt sammen processer der er med til at øge kompleksiteten ved en definitiv beskrivelse af disse forhold.

Boreerfaringer

Saltene i den danske salthorstprovins har, ligesom salte i andre salthorstprovinser, egenskaber og forhold, som i nogen grad er et særkende netop for dem. Der er ikke store afvigelser, men nok til at påvirke en boring og i værste fald forlænge boretiden.

Disse problemer kan samles i hovedgrupperne: "Lost circulation" i cap rock, tilstedeværelse af gas, brine og tektoniseret stensalt.

I skema 3 er angivet antal tilfælde af "lost circulation", som opstår, når trykket af boremudderet er større end trykket af formationsvandet og mudderet ikke returnerer til overfladen men trænger ud i formationen. Hidtil er disse tab af boremudder set i forbindelse med tilstedeværelsen af gips, specielt den velkrystalliserede form ved eller lige over saltspejlet.

Tilstedeværelsen af gas og specielt petroleumsgas antages at stamme fra den bituminøse skifer. Den detekteres som formationsgas ved gennemboring af overgangszonen og er truffet ved flere boringer, og har forårsaget "blow out" i to tilfælde, har været den drivende kraft ved to brine udbrud og i et tilfælde er den registreret i forbindelse med "lost circulation". De to "blow out" forekom i Batum

13 og Tostrup 1 og varede henholdsvis 90 og 20 minutter. Det ene tilfælde af gasobservation var i Tostrup 3. Gas i forbindelse med tilstedeværelse af brine er observeret i boringerne Suldrup 8 og 10.

Brine-akkumulering i saltet er observeret dels under tryk i boringerne Suldrup 8 (min. $200 \text{ m}^3 \text{ CaCl}_2$ -opløsning) og Suldrup 10, dels som spredt væske i saltet. Brinen er opløsninger af Na, K, Mg og Ca-klorider og kan influere på boremudderets tilstand, således, at det i værste fald begynder at koagulere og besværliggøre boringen.

Det tektoniserede salt, dvs. salt, der har været ude for en kraftig påvirkning under salthorstdannelse, er ofte blevet folieret, bl.a. som det er beskrevet i kapitel 2, kan påvirke boringens udførelse, så det er vanskeligt at holde den anbefalede retning.

De her nævnte forhold er de geologiske betingelser, der arbejdes under i salthorstområder, blot mere eller mindre markant end i Danmark. Det er de forhold, der sammen med den indre struktur (ofte komplicerede gardinfoldninger) er med til at udgøre den geologiske risiko ved alt borearbejde i en dansk salthorst.

Zechsteinsaltet som råstof

En gennemgang af de danske Zechsteinsaltes anvendelsesmuligheder som råstof må tage hensyn til igangværende anvendelser og fremtidig brug anskuet ud fra de foretagne prospekteringer samt anvendelser af salt i andre områder. Zechsteinsaltets økonomiske værdi er knyttet til flere forhold: Indvinding af gas og olie, minedrift, kavernekonstruktion og deponering af kemisk og varmeproducerende affald.

I relation til indvinding af gas og olie har forekomsten af Zechsteinaflejringerne både primær og sekundær betydning. Den primære betydning er som moderbjergart for kulbrinter, de bituminøse skifre og en eventuel

forekomst af stromatolitrev. Skifrene er generelt for tynde, medens revforekomster vil have potentielle muligheder. Den fornødne porøsitet og permeabilitet til en koncentration af kulbrinterne kan forventes at være til stede i de tilstødende karbonater. Det omgivende stensalt vil fungere som segl.

Den sekundære betydning af saltet er dels som segl for kulbrinteforekomster, der er ældre end Zechstein, og dels som danner af salthorste, der har skabt et strukturelt mønster, som i høj grad har skabt gode fælder for gas og olie. Det er et velkendt fænomen, at gassen og olien akkumuleres i fælder over salthorstene, ligesåvel som i fælder på flankerne af horstene.

Ved minedrift tænkes først og fremmest på brydning af kalisalte og stensalte. Medens der for minedrift efter stensalt kun er udført forundersøgelserprojekter, så er der gennemført en egentlig kaliprospektering i årene 1959-1961 af Boreudvalget i Suldrup salthorst. Resultatet af denne undersøgelse var imidlertid nedslående. Kaliindholdet var for lavt til en rentabel minedrift.

Hovedkalizonen, Veggerby, som svarer til den tyske Stassfurt, der brydes i Tyskland, er gennemboret i andre salthorste: Hvornum og Tostrup, hvor den svarer til Suldrup. I Mors salthorst er kali- og kieserit-indholdet højere, men stadig for lavt til, at en brydning for tiden vil være rentabel.

Der er for tiden en væsentlig større interesse for det grå stensalt, ikke ved brydning, men til NaCl-produktion ved udskylning, til konstruktion af gaskaverner og med planer om olieaverner, trykluftkaverner til luftmagasinkraftværk og til deponering af højaktivt affald.

I alle tilfælde er det grå stensalt med spredt anhydrit målet for efterforskningen men med små forskelle i kravene til saltets kvalitet. Generelt ønskes rent

stensalt med små mængder anhydrit og stort set uden brine-ansamlinger, overgangszonen Z1/Z2, kalimineraler m.v. Den brugbare mængde grå salt af denne type i Danmark kan angives i areal salthorst. Et kvalificeret skøn over mængden vil svare til ca. 100 km² brugbart salthorstareal.

Med dette areal som eksempel kan gives et skøn over anvendelsen af horstenes grå stensalte. Der er ikke taget hensyn til, at en eventuel minedrift i almindelighed vil udelukke anden anvendelse, i samme salthorst. Ved kavernekonstruktion og udskylning er der regnet med 200 m center til center afstand ved NaCl-produktion, 300 m ved olieka-vernekonstruktion og 400 m ved gaska-vernekonstruktion, der også antages at dække luftmagasinkonstruktion. Ved deponering af højaktivt radioaktivt affald er anvendt ELKRAFT/ELSAM's model med 8 huller med 200 m's afstand. Dette svarer til affald fra 6 x 1000 MW's kraftværker i 25 år.

Dette giver som eksempel følgende anvendelsesmulighed af det grå stensalt i den danske salthorstprovins og uden minedrift efter kali eller stensalt.

NaCl-produktion ved opløsning	ca. 3200 kaverne
eller olieka-verne	ca. 1400 kaverne
eller gaska-verne	ca. 800 kaverne
eller anlæg for højaktivt radioaktivt affald	ca. 400 anlæg.

2. BESKRIVELSE AF OVERGANGSZONEN ZECHSTEIN 1 - ZECHSTEIN 2 I BATUM 13.

I boringen Batum 13, der blev boret i 1952 af DAPCo, blev overgangszonen Z1/Z2 (anhydrit-dolomitzonen) kernet. I forbindelse med gennemboringen indtraf et "blow out" af petroleumsgas med en gennemsnitssammensætning af 79% metan, 9.5% ætan, 3% propan, 6.5% kvælstof og 2% andre gasser. "Blow out'et" varede ca. 90 minutter og døde ud af sig selv. Efter boringens afslutning blev zonen testet. Kun små mængder gas uden kommerciel værdi blev produceret sammen med en mindre mængde brine.

Overgangszonen er detaljeret beskrevet. Der er benyttet de tyske bjergværksnavne, hvor disse giver en bedre beskrivelse end de danske. Den gennemborede zone er retvendt med de yngste salte øverst.

414,5-415,4 m: Stensalt, gråt, gennemskinneligt med anhydritskyer. Zechstein 2.

415,4-417,8 m: Flaseranhydrit, lysegrå-gråblå, med slirer af karbonat, brunsort, leret, spor af organisk materiale.

417,8-419,1 m: Manglende kernemateriale, der er angivet i bunden af afsnittet.

419,1 m: Gas "blow out", 90 minutters varighed.

419,1-420,6 m: Flaseranhydrit og Schwadenanhydrit, lysegrå med slirer af karbonat, mørkegrå-sort, leret med organisk materiale.

420,6-421,4 m: Karbonat-skifer, leret, gråbrun og sort, fint lamineret og med organisk materiale.

421,4-427,5 m: Anhydritknotenschiefer, gråbrun, dolomit-matriks, finlagdelt, leret med anhydritøjne (1-10 mm).

427,5-429,1 m: Schwaden- og Wolkenanhydrit, lysegrå-gråblå med uregelmæssige lag af karbonat, brunsort, leret med organisk materiale.

429,1-432,0 m: Anhydritknotenschiefer, brunsort, består af lagdelt karbonat, leret med anhydritøjne (3-10 mm) og med organisk materiale. Stærk kulbrintelugt, når kernen knækkes.

432,0-432,9 m: Schwaden- og Wolkenanhydrit, lysegrå-gråblå med uregelmæssige lag af karbonat, brunsort, fint lamineret, leret og med brunsort materiale.

432,9-433,3 m: Anhydritknotenschiefer, brunsort, krøllet lamineret karbonat med lysegrå-blågrå anhydritøjne.

433,3-434,0 m: Anhydrit, lysegrå-gråblå, massiv med uregelmæssige lag og slirer af brunsort karbonat.

434,0-434,6 m: Karbonat, leret, lys gråbrun, fint lamineret.

434,6-435,5 m: Anhydritknotenschiefer, brunsort, leret, lagdelt med organisk materiale og med anhydritøjne (2-10 mm).

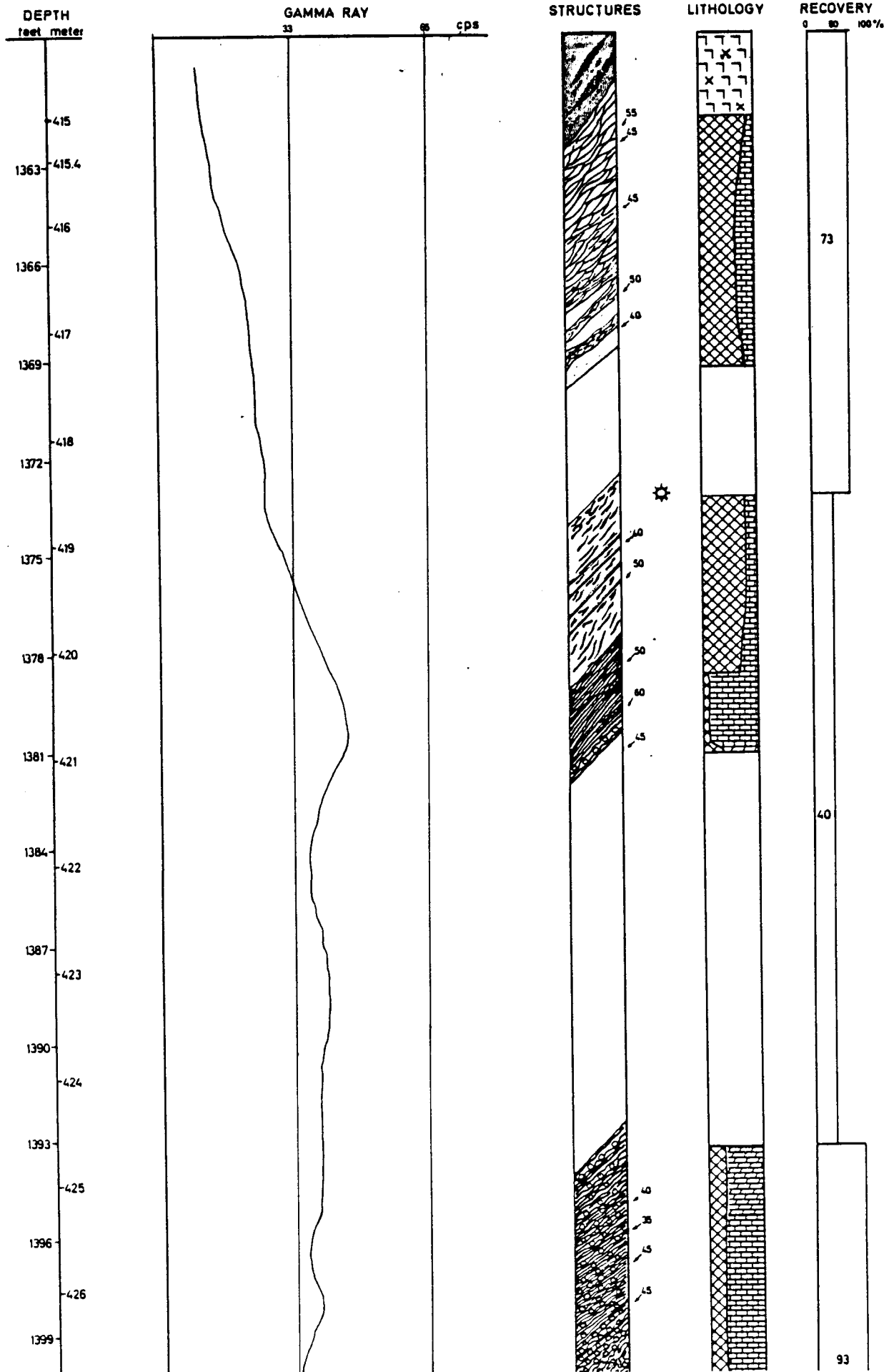
435,5-436,1 m: Schwaden- og Wolkenanhydrit, lysegrå-gråblå. Kulbrintelugt, når kernen knækkes.

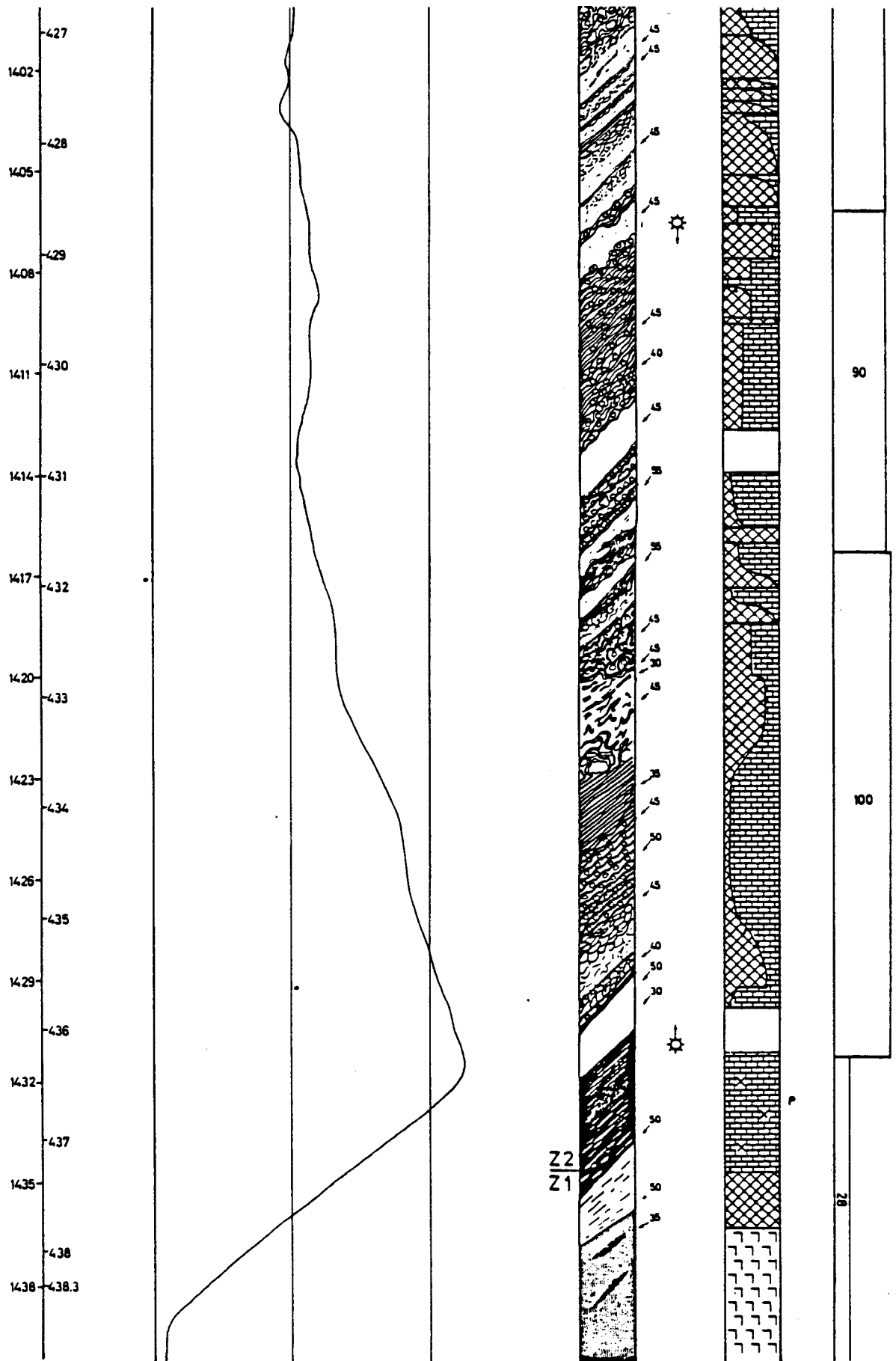
436,1-437,8 m: Karbonat, anhydritisk med ler, brunsort, fint lamineret, organisk materiale og pyrit. Ældste led af Z2.

437,8-438,3 m: Anhydrit, massiv, lysegrå-gråblå, diffust lagdelt. Yngste led af Z1.

438,3-442,9 m: Stensalt, lyserødt, grovkornet. Z1.

BATUM 13





Legend:

Lithology:



Halite



Anhydrite



Carbonate



Dolomite

P

Pyrite

Structures:



Crystalline/
- cloudy



Massive,
streaky



Diffusely
bedded
massive



Mosaic/
Nodular
mosaic



Bedded
nodular



Distorted
bedded
nodular
and highly
distorted
mosaic



Distorted
mosaic
and highly
distorted



Finely
laminated

3. GEOKEMISK UNDERSØGELSE AF ZECHSTEIN SALT OG ANHYDRIT FRA BATUM DOMEN.

Indledning

Formålet med denne undersøgelse har været at indhente de første oplysninger om sporstof-sammensætningen af det danske Zechstein salt med henblik på at kunne foretage en geokemisk adskillelse af det grå salt (Na¹ og Na²) fra de to stensalt cykler Zechstein 1 og 2.

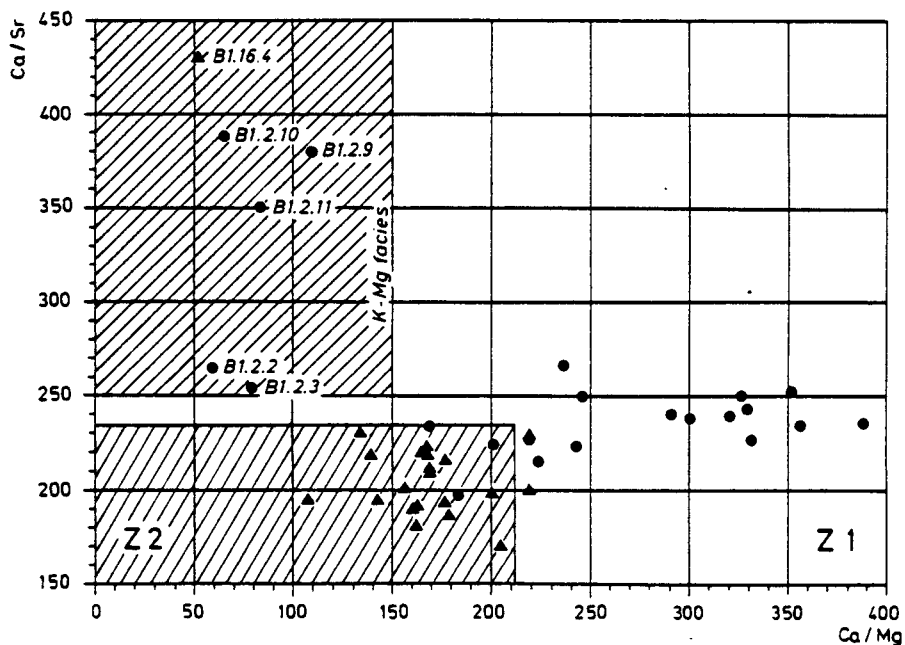
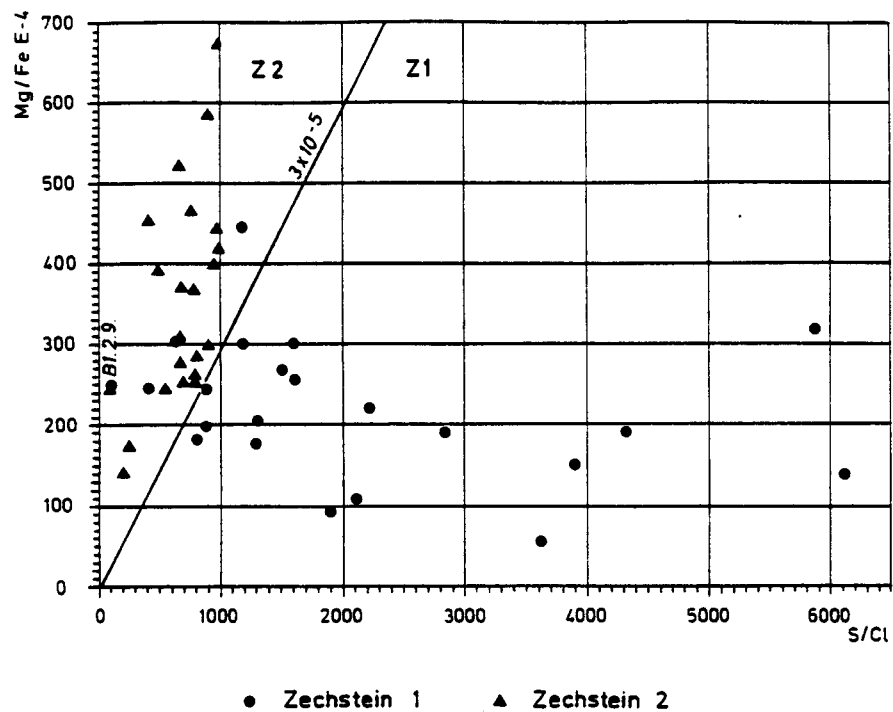
Metoder og Resultater.

Undersøgelsen har i særlig grad været koncentreret om anhydrit, der er det vigtigste accesoriske mineral i stensalt, fordi anhydrit er resistent over for metamorf rekrySTALLISATION af stensaltet. Anhydrit formodes derfor at afspejle den primære kemi på det tidspunkt, hvor mineralet udkrystalliserede fra det koncentrerede havvand.

I alt 43 anhydritprøver udvasket af stensaltkerner og 10 stensaltprøver, repræsenterende et mindre afsnit (ca. 50 m) af hver serie, er analyseret for grundstofferne S, Cl, Ca, Mg, K, Ti, Mn, Fe, Ca, Zn, Br, Rb, Sr, Y, Ba, La og Pb ved røntgenfluorescens-analyse. Endvidere er B analyseret ved en automatisk spektrofotometrisk metode.

Der er konstateret statistisk meget signifikante forskelle mellem fordelingen af grundstofferne Mg, Ti, Mn og Sr samt forholdene S/Cl, Mn/Fe, Ca/Mg og Ca/Sr i de to undersøgte afsnit af Z1 og Z2. Denne observation kan forklares ved en karakteristisk geokemisk forskel mellem de to saltcykler men kan også forklares ved, at de undersøgte afsnit repræsenterer forskellige trin i en inddampningscyklus. Kun en undersøgelse af hele Zechstein serien kan afgøre dette.

Skema 4 giver en oversigt over median værdi og 50% konfidens-interval for de mest signifikante grundstoffer/grundstofforhold, mens variationsdiagrammerne fig. 2a og b viser fordelingen af anhydritanalyser fra det grå salt repræsenterende henholdsvis Z1 og Z2 serien. Det fremgår af figurerne, at klassifikation af enkeltanalyser



Figur 2a og b. Variationsdiagrammer, der viser fordelingen i Zechstein 1 og 2 prøverne.

kan foretages med god sikkerhed (ca. 90%). Rapporten anviser en mere sikker metode, hvis analyserne skal benyttes i en geokemisk stratigrafi.

Anhydritanalyserne antyder at K-Mg facies betingelser kan have optrådt i 3 niveauer inden for de undersøgte afsnit af evaporitserien, hvorimod disse anomalier ikke kan genfindes i de associerede stensaltanalyser. Det foreslås, at en cirkulerende fluid fase, under den metamorfe

Element/ elem. ratio	Z1 Series		Z2 Series	
	M	Q25-Q75	M	Q25-Q75
Ti ppm	47	37.5-57.0	70	57.0-86.0
Mn ppm	7.5	5.8-9.2	14	12.0-18.4
Sr ppm	1201	1116-1246	1405	1335-1470
S/Cl	1554	830-2400	767	600-830
Mn/Fe $\times 10^{-2}$	2.30	1.82-2.78	3.68	2.80-4.45
Ca/Mg	239	180-305	166	148-180
Ca/Sr	241	229-254	202	196-216

Skema 4. Klassifikation af anhydrit fra boringen Batum 1A. Hver serie er karakteriseret af median M og 50 % konfidensintervallet.

rekrySTALLISATION af evaporitserien, har fjernet de letopløselige K-Mg mineraler. Denne episode kunne også være ansvarlig for det meget ensartede og ret høje Br-indhold, der er iagttaget i stensalt fra begge sektioner (210 +/- 10 ppm Br).

Den ensartede fordeling af mange grundstoffer i anhydriten heriblandt Ti, Mn, Fe, Zn, Br og Sr, der formodes at afspejle forholdene i brinen på aflejringsstidspunktet, støtter formodningen om, at evaporitdannelsen foregik i et stort marint evaporitbassin.

KAPITEL 2

1. STENSALTETS TEXTURELLE OPBYGNING

Af Jørgen Gutzon Larsen

2. STATISTISK ANALYSE AF STENSALTS MEKANISKE EGENSKABER

Af Per Lagoni

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. STENSALTETS TEXTURELLE OPBYGNING.	39
Jørgen Gutzon Larsen.	
Indledning	39
Generel beskrivelse	39
Petrografi	40
Texturelle analyser	41
Fremstilling af prøver	41
Analytiske metoder	42
Resultater ved anvendelse af billedanalysator	42
Texturel analyse i relation til den bjergartsmekaniske styrke	44
Analyser af stensaltets texturelle opbygning	46
Analytiske metoder	46
Analytiske resultater af de texturelle målinger	47
Diskussion af de texturelle data	48
Konklusioner	50
2. STATISTISK ANALYSE AF STENSALTS MEKANISKE EGENSKABER.	52
Per Lagoni.	
Indledning	52
Analytiske metoder	53
Indledning	53
Saltparametre og materialemodeller	54
Empiriske modeller af stensaltets mekaniske adfærd	55
Ikke-mekaniske saltkarakteristikas indflydelse	55
Anvendte analytiske metoder	55
Korrelationsanalyse	56
Almindelig regressionsanalyse	56
Datakilder	57
Resultater	58
Korrelationsanalyse	58
Regressionsanalyse	59
Krybeadfærden	60
Konklusioner	61

KAPITEL 2

1. STENSALTETS TEXTURELLE OPBYGNING.

Indledning.

Tostrup saltdomen i N.Jylland er udvalgt af Dansk Olie og Naturgas A/S som egnet til gaslagring. Af de 10 udførte boringer er Tostrup 5-10 valgt til udskylning af gaskaverner. Der er boret et stort antal saltkerner fra disse boringer. Da kavernes stabilitet er afhængig af saltets fysiske egenskaber, er saltkernerne mekaniske styrke undersøgt ved kort-tids uniaxiale og triaxiale trykprøver og langtids krybeprøver.

Det har vist sig, at de uniaxiale prøveresultater varierer stærkt fra 12 til 15 MPa, hvilket indikerer, at saltet opfører sig forskelligt, hvis trykket i kavernen falder til atmosfæretryk. I modsætning her til viser de triaxiale prøver, at saltet er ret homogent, når prøven er udsat for et alsidigt tryk af en vis størrelse. Denne undersøgelse er begrænset til uniaxiale trykprøver for her igennem at forklare den store variation i de opnåede resultater. Målet for undersøgelsen har været at udvikle metoder til systematiske texturelle analyser omfattende dels en generel petrografisk beskrivelse, i hvilken krystalform og krystallografisk orientering er relateret til hovedstrukturerne og deformationshistorien og dels en relatering af kvantificerede texturelle parametre med de bjergartsmekaniske forsøgsdata.

Generel beskrivelse.

Kernematerialet.

Stensaltprøverne fra Tostrup saltdomen består af ca. 9 m lange kerner med en diameter på 100 mm. På borepladsen

bliver kernen beskrevet og målt op. Kernen deles i prøvestykker til kemiske analyser, mekaniske prøver og tpeestykker etc.

Petrografi.

Stensaltet i Tostrup domen er en næsten mono-mineralisk bjergart bestående af halit og som indeholder bånd af anhydritisk stensalt. De anhydritiske bånd består af få procent kasseformede små anhydritkrystaller i stensaltet. Båndingen repræsenterer den oprindelige horisontale lagdeling.

Stensaltet klassificeres efter kornstørrelse og efter saltets forskellige metamorfe teksturer.

Anhydritbåndingens orientering måles som rutinearbejde på borepladsen. Målingerne benyttes til bestemmelse af foldestrukturen i den pågældende boring.

Under saltets deformation dannes en mere eller mindre udtalt foliation og til tider også en lineation. Foliationen har normalt en temmelig konstant orientering inden for hver kerne. I nogle tilfælde kan en krystallineation iagttages på itubrudte overflader, der følger foliationsplanet. Når lineationen er udtalt, ses den at være parallel til subparallel med foliationens hældningsretning.

Ved fremstilling af prøvestykker fra kernerne blev disse som regel skåret vinkelret på strygningen henholdvis hældningen. Ved denne procedure vil prøvestykkets overflade almindeligvis ikke indeholde deformationsaksernes maksimums- og minimums-værdier. Derimod opnås det at få kornformen frem i foliationens hældningsretning, hvilket antages at være vigtigt, når de texturelle data sammenholdes med trykstyrken. På trods af usikkerheden, om de sande deformationsakser er parallelle til subparallelle med det foretagne snit, har denne undersøgelse vist, at a-aksen (den lange deformationsakse) for det meste er subparallel med

foliationens hældningsretning, at b-aksen er subparallel med strygningen og at c-aksen (den korte deformationsakse) er vinkelret på foliationsplanet. Den generelle orientering af deformationsakserne antyder en dominans af horisontale foldeakser i To-6, -8, -9 og -10, hvilket er i overensstemmelse med de konstruerede svagt dykkende foldeakser (0-30°) fra de samme borer.

På grund af stensaltets grovkornede struktur er almindelige tyndslib mindre egnede til mikroskoparbejde. Slib med en tykkelse på 3-5 mm viste sig dog at være velegnede til undersøgelse med stereomikroskop, fordi de krystallografiske retninger tydeligt angives af væskeindeslutningerne (negative terninger) i kornene og fordi spalteretningerne kan fremprovokeres med flydende nitrogen. Det lodret folierede Tostrup salt viser typisk, at korngrænserne er "åbne" og at (100)-spaltefladerne ofte er roterede i forhold til kornene, hvilket viser ekstensiv deformation. Stærkt buede irregulære spalteflader kan korrespondere med (110)-glideplanerne.

Texturelle analyser.

I de texturelle analyser er adskillige parametre af interesse: saltkornenes længde, bredde og tykkelse repræsenterende a-, b- og c-akserne i deformations-ellipsoiden samt kornenes areal og perimeter.

Det er meget vanskeligt at finde de sande værdier for disse parametre, fordi de skårne prøveoverflader repræsenterer alle slags snit i irregulære elliptiske eller linseformede krystaller. Men de relative forhold imellem parametrene er lige så vigtige som de sande værdier.

Fremstilling af prøver.

De anvendte kernestykker blev skåret vinkelret på foliationens strygning, (dip section: DS), henholdvis

vinkelret på foliationens hældningsretning, (strike section: SS). I enkelte tilfælde blev også fremstillet prøver skåret parallel med foliationsplanet. For at opnå en jævn overflade blev snittet slebet glat men ikke poleret. Prøven anbringes i en svagt overmættet NaCl-opløsning i et par timer. Halitkornene i prøven udvikler små NaCl-terninger på den jævne overflade i slibesporene. De små terninger er krystallografisk orienteret i overensstemmelse med det pågældende korn i prøven. Dernæst fremstilles et replica (peel) af prøveoverfladen ved hjælp af acetatfilm og acetone. Filmen fjernes efter et par minutter fra prøven, tørres og glattes med et strygejern. Korngrænserne trækkes op med en tuschpen.

Analytiske metoder.

På de fremstillede replica blev den maksimale længde og bredde af de enkelte korn målt manuelt og behandlet statistisk. Denne metode giver den bedste database for sammenhørende værdier af længde og bredde for de enkelte korn. Metoden er tidskrævende og den giver ikke værdierne for kornenes areal og perimeter.

Til måling af kornenes areal og perimeter samt den maksimale længde blev anvendt en Leitz TAS automatisk billedanalysator. Sammenhørende værdier af længde og bredde kan ikke udføres i samme løb. Af økonomiske grunde blev kun længden målt. Den omskrivende kurve, der automatisk bliver indlagt om kornet, blev ligeledes målt. Den manglende bredde c og c^* af korn og omskrivende kurve blev beregnet ud fra middelarealet og middellængden.

Resultater ved anvendelse af billedanalysator.

1. Stensaltet er karakteriseret ved arealfordelingen i relation til den maksimale kornstørrelse. Mængden af korn aftager mere eller mindre asymptotisk med størrelsen. Saltet er generelt heteroblastisk set i detaljen.

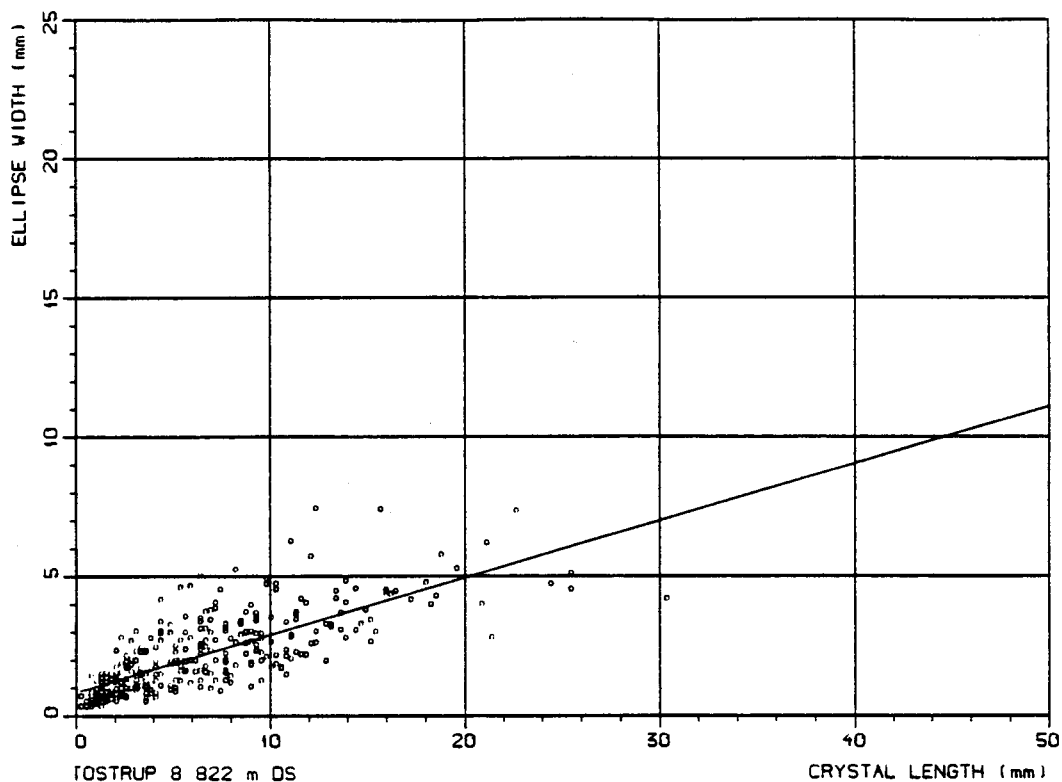


Fig. 1. Repræsentativt a-c variationsdiagram for deformeret Z2 salt.

2. På grundlag af målingerne af halitkornenes akser a, b og c er forholdene a/c^* og b/c^* beregnet for at få et udtryk for halitkrystallernes deformation, figur 1. Det ses, at To-6 saltkornene har en højere grad af "flattening" end To-8 og -9. Forholdene a/b og b/c^* viser, at deformation langs a- og c-akserne (plain strain) samt "flattening" er de dominerende deformationstyper. Stensaltet er således deformeret under komplicerede triaxiale spændingsbetingelser.

Deformationsgraden er proportional med det aktuelle forhold a/c^* . Et groft overslag af deformationsgraden viser, at deformationen af det grå salt i To-6 andrager 52-75% og af det grå salt i To-8, -9 og -10 21-55%, hvorimod det farvede Z3-salt i To-8 kun viser 5% deformation.

3. Saltkornenes indbyrdes indvoksningsgrad kan måles ved hjælp af de specifikke formfaktorer SP og SP* defineret som perimeter divideret med areal. Formfaktorerne har høje værdier for små korn og for store korn med stærkt slyngede (interlobing) korngrensers.

For at kvantificere indvoksningsgraden uafhængig af kornstørrelsen indføres en elliptisk formfaktor EFF. Denne faktor sammenholder et korns målte perimenter P med perimenteren af en ellipse, der har det samme areal A og samme a-akse som det pågældende korn: $EFF = 2aP / (\pi a + 4A)$.

En EFF-værdi større end 1 viser, at kornet har en længere perimenter end den ellipse, der har den korteste perimenter for et givet areal og given lange akse. I almindelighed har små korn (mindre end 2 mm i længden) høje EFF-værdier og korn længere end 2 mm tenderer mod lavere EFF-værdier.

EFF er beregnet som middelværdien af de enkelte korns EFF-værdi, hvor imod EFF* er beregnet ud fra korndimensionernes middelværdier. EFF* er således blevet vægtet i overensstemmelse med kornarealerne, hvorved de små korn tæller mindre.

EFF*-værdierne er generelt højere i To-6 end i To-8, -9 og -10 i DS-snit. Grunden hertil synes at være, at kornene i To-8, -9 og -10 er tættere på ellipseformen end de stærkt deformerede korn i To-6. Kornene er mere linseformede end ellipseformede.

EFF-værdiernes variation i snit vinkelret på strygningen (DS) viser tydeligt overlappning i borerne To-6, -8 og -9.

Texturel analyse i relation til den bjergartsmekaniske styrke.

Saltets bjergartsmekaniske styrke er blevet målt på Danmarks Tekniske Højskole og på Lehrgebiet für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover. I nærværende arbejde er kun anvendt resultaterne fra de uniaxiale forsøg, fordi de triaxiale forsøgsresultater ikke var til rådighed ved denne undersøgelse.

De uniaxiale forsøg er udført under laboratoriebetingelser på saltkerner, der kan være svækket som følge

af borearbejdet, den efterfølgende håndtering af kernerne og under prøveemnefremstillingen. En medvirkende årsag til svækkelse af kernerne kan være den trykaflastning og det temperaturfald, kernen har været underkastet fra in situ til laboratoriet. Nettovirkningen kan være mikrotensionssprækker. Kernernes brudstyrke (trykstyrke) måles i megaPascal (MPa).

Relationerne mellem foliationshældningen og trykstyrken: Trykstyrken i forbindelse med de geologiske data viser, at de stejlt folierede prøver er svagere end prøver med svagt hældende foliation, manglende foliation eller finkornede prøver. De dannede brudflader i prøven tenderer til at følge prøvens foliation, hvis hældningen er mere end 50° .

Figur 2 viser relationen mellem foliationens hældning og trykstyrken. Det er tydeligt, at relationen er invers.

Relationerne mellem kornstørrelse og trykstyrke: Kornstørrelsen har stærk indflydelse på stensaltets

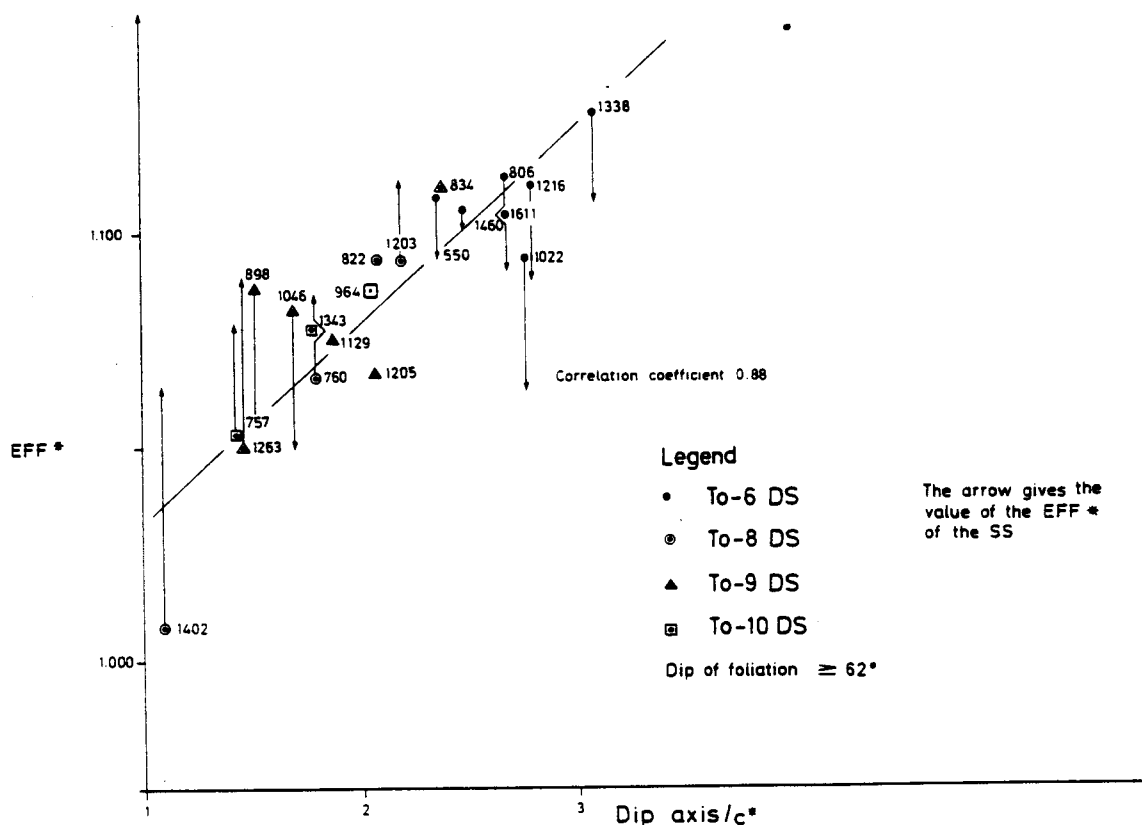


Fig. 2. Variationsdiagram for hældningsaksen versus den elliptiske formfaktor.

styrke. Fin- til mellemkornede prøver har trykstyrker på 23-34 MPa og er meget stærkere end grovkornede prøver med samme foliationshældning. Graden af "flattening" er lav i det finkornede salt.

Relationerne mellem graden af "flattening" og trykstyrken:

Graden af "flattening" udtrykkes ved forholdet a/c^* , hvor a er den lange akse i foliationshældningens retning. Jo større dette forhold er, jo fladere er kornene og jo lavere er trykstyrken. I vel folierede prøver virker foliationen som spalteplaner og i de uniaxiale forsøg følger brudfladerne foliationsplanet, når dette er stejlt hældende ($0-40^\circ$) til lodret. Der er ingen korrelation mellem formfaktorerne SP , SP^* samt EFF og trykstyrken, hvor imod der er en negativ korrelation mellem EFF^* og trykstyrken, fordi EFF^* korrelerer med graden af "flattening".

Analyser af stensaltets texturelle opbygning.

Analytiske metoder.

Texturelle analyser af bjergarter foretages konventionelt på tyndslib af bjergarten med hjælp af et universalbord på mikroskopet. I nærværende undersøgelse blev 3-5 mm tykke slib anvendt i forbindelse med et stereomikroskop og almindeligt universalbord. Halitkrystallernes krystallografiske orientering blev bestemt ved hjælp af væskeindeslutningerne i halitkrystallerne samt ved hjælp af fremprovokerede (100)-spalteflader: chock-køling med flydende nitrogen. Metoden er meget tidsrøvende.

En ny statistisk metode er introduceret: texturelle reflektionsmålinger i forbindelse med Smith's arealtro netprojektion.

Reflektionsmålingerne udføres på to sammenhørende halvkugler med 10 cm diameter drejet ud af saltkernerne. Halvkuglernes overflader er bevokset med små

halitterninger i krystallografisk overensstemmelse med prøvens halitkorn. De sammenhørende halvkugler monteres i et stort universalbord, konstrueret på DGU. Ved at belyse prøven med lodret, parallelt lys, der tilbagekastes fra fladerne af de små halitterninger på halvkugleoverfladerne, kan de enkelte korns krystallografiske akser bestemmes. Reflektionsmålingerne indlægges på et Smith's net og den procentuelle intensitet bestemmes.

Analytiske resultater af de texturelle målinger.

a. Ikke-trykprøvede prøver. Polerne til de kubiske flader er generelt placeret i foliationsplanet, i nogle tilfælde med maksima subparallelt med a- og b-akserne.

b. Trykprøvede prøver. Der blev foretaget en texturell analyse på det uniaxialt og triaxialt trykprøvede stensalt fra To-6 for at se, om der var foregået nogen

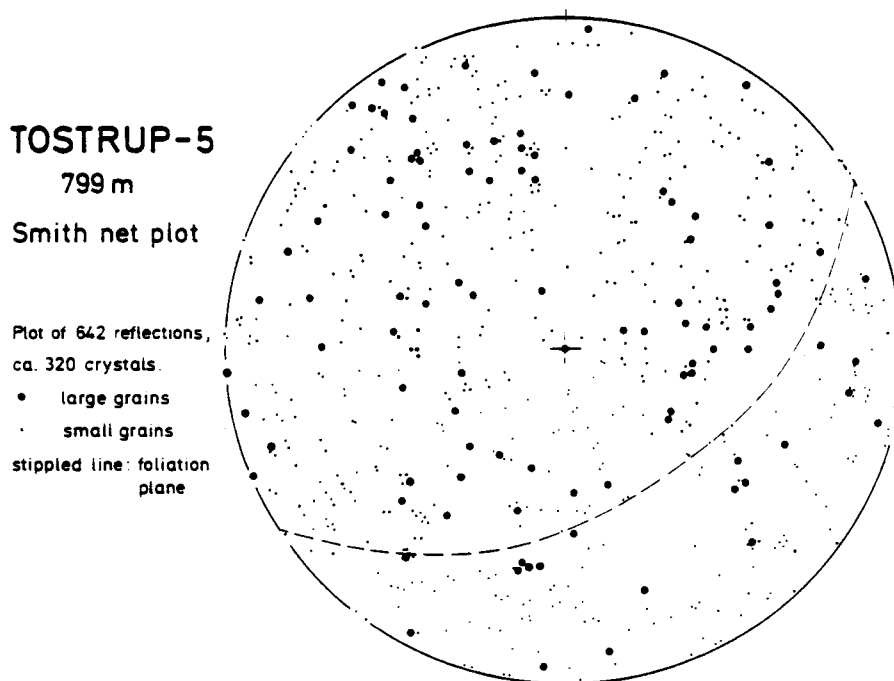


Fig. 3. Smith's net plot af 100 krystallers tre (100) poler. Uniaxialt trykprøvet salt.

ændring i den krystallografiske orientering. Den texturelle opbygning er fremstillet i figur 3 som et composite plot, der relaterer den krystallografiske

orientering med den næsten lodret hældende foliation. Figuren viser en koncentration af (100)-flader langs det vertikale foliationsplan med maksimumsværdier tæt ved a-, b- og c-akserne.

Den texturelle opbygning af det triaxialt trykprøvede salt viser tilstedeværelsen af et bælte af (100)-flader vinkelret på maksimumsspændingen, det vil sige vinkelret på det oprindelige foliationsplan men parallel med den maksimale grad af kornenes "flattening", figur 4.

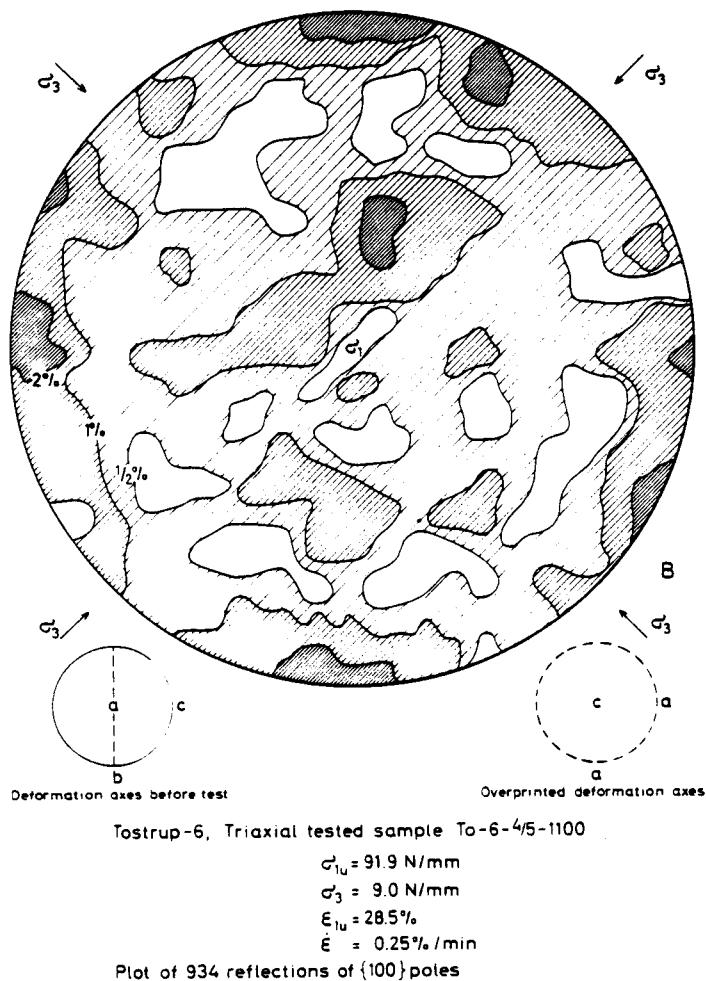


Fig. 4. Smith's net plot af 934 reflektioner. Triaxialt trykprøvet To-6 salt.

Generelt set er den oprindelige texturelle opbygning bevaret, selv om bæltet med de maksimale (100)-poler kan have skiftet fra vertikal til horisontal position.

Diskussion af de texturelle data.

a. Ikke-trykprøvet stensalt. Den texturelle opbygning af Tostrup stensaltet med to (100)-pols maksima i

foliationsplanet og et maksimum vinkelret på dette er meget lig den opbygning, der findes i det stærkt foldede salt i Texas og Louisiana saltdomer.

En foretrukken krystallografisk orientering af lige store korn kan ved lave temperaturer skyldes rotation eller intern glidning med påfølgende kornrotation.

I henhold til eksperimentelle data forekommer deformation af halit langs slipsystemerne $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$, $\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ og $\{100\}\langle 110\rangle$, figur 5. Systemerne aktiveres med stigende spænding. I To-5, 799 m dybde, ses en tendens til textuel opbygning efter sidstnævnte slipsystem med to maksima i bevægelsesplanet imellem a- og b-akserne. Den genetiske tolkning er dog i almindelighed usikker. Men de fundne data viser, at stensaltet er anisotropt og derfor har tendens til at krybe lettere i nogle retninger end i andre.

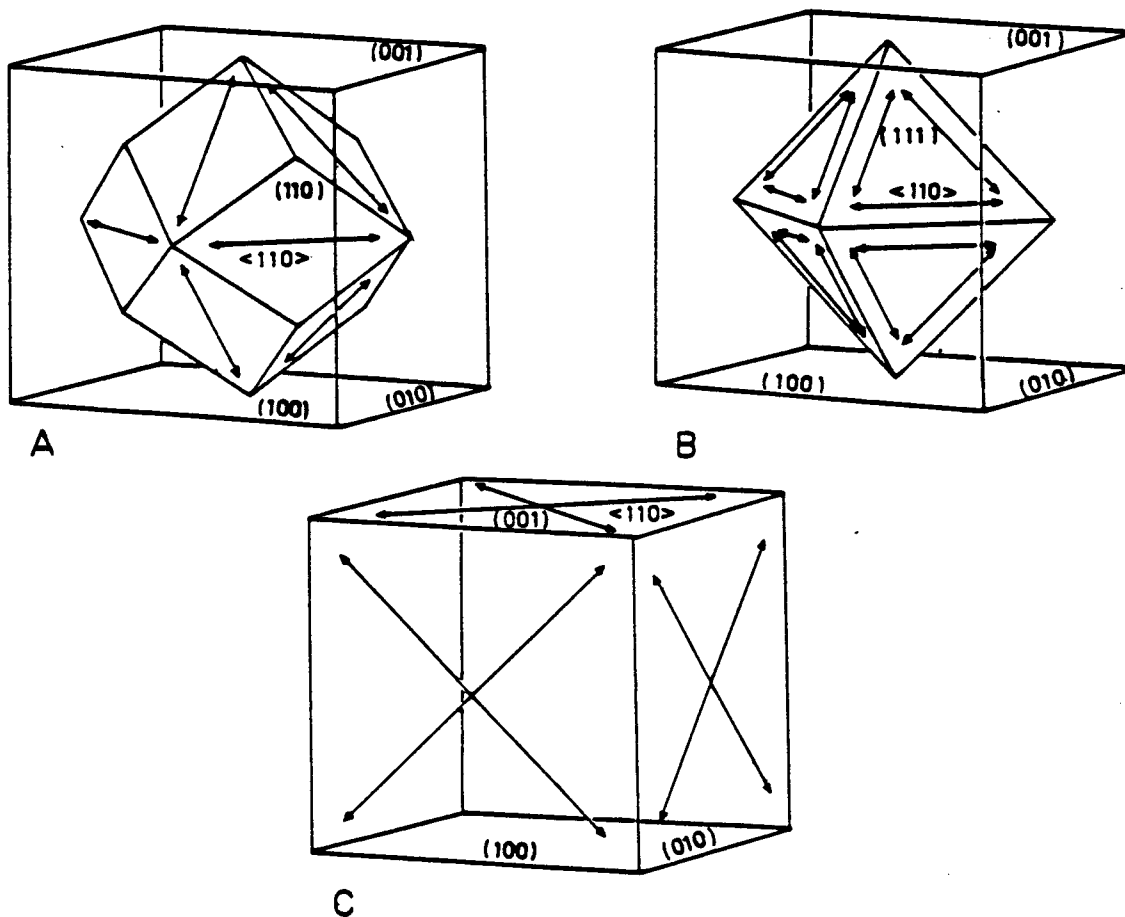


Fig. 5. Halits tre slipsystemer.

b. Trykprøvet stensalt. Det er svært at forklare den textuelle opbygning af det triaxialt trykprøvede salt.

Men opbrydningen af det vertikale (100)-pols bælte kunne skyldes slip langs $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ slipsystemet i forbindelse med en rotation om en af de horisontale akser. Den oprindelige opbygning vil favorisere dette slipsystem, som er det letteste at aktivere ved lav temperatur. Desuden har det trykprøvede prøvestykke en stærk prægning af den oprindelige opbygning, men det vertikale bælte af (100)-flader er skiftet til diffuse maksima omkring retningen for maksimal deformation ("flattening"), hvor imod et (100)-pols bælte synes at være dannet i planet for maksimal "flattening".

De diffuse maksima omkring den maksimale spændingsretning kan skyldes rotation af kornene omkring en af de krystallografiske akser ved hjælp af $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ slipsystemet.

Nedenstående konklusioner baserer sig udelukkende på kort-tids uniaxiale trykforsøg, der blev udført ved stuetemperatur.

Konklusioner.

Der har ikke vist sig nogen simpel relation mellem stensaltets kornstørrelsesfordeling og graden af deformation eller stratigrafisk niveau.

Målingerne af deformationsakserne sammenholdt med de strukturelle analyser indikerer, at de lange deformationsakser a for det meste er subparallelle med foliationsplanets hældningsretning, at de intermediære akser b er subparallelle med foliationsplanets strygning og at de korte deformationsakser c er vinkelrette på foliationsplanet.

Forholdene a/c og b/c viser dominerende simpel deformation og simpel "flattening". Deformationsmønsteret er derfor komplekst.

Den beregnede eliptiske formfaktor $EFF = \text{kornperimeter/beregnede ellipserperimeter}$ giver en vurdering af kornets indvoksningsgrad i forhold til en ellipse. EFF korrelerer med deformationsgraden udtrykt ved a/c , hvor a er den lange og c den korte deformationsakse. EFF er mere afhængig af kornets almindelige form end af overfladens ujævnheder. Grunden er antagelig, at de stærkt deformerede korn snarere er linseformede end ellipseformede. Fremtidige arbejder bør derfor koncentrere sig om beregningen af en linseformfaktor LFF .

De texturelle reflektionsanalyser viser maksimum af (100)-polar i foliationsplanet og vinkelret på dette med tendens til, at disse maksima er subparallelle med deformationsakserne a , b og c samt diagonal til a - og b -akserne og endelig placeret uden for de planer, der er defineret af disse akser. Disse forhold viser, at stensaltet er strukturelt anisotropt. Reflektionsmålingerne gør det muligt at bestemme graden og orienteringen af deformationen af de individuelle krystaller i prøven. Det er måske muligt med sådanne målinger at fastlægge glideplanerne i disse grovkornede bjergarter.

Den uniaxiale vertikale trykstyrke af Tostrup domens stensalt er afhængig af

1. kornstørrelsen
2. foliationens hældning
3. kornformen,

hvorimod kornenes krystallografiske orientering spiller en mindre rolle. Blandt de grovkornede bjergarter påvirker kornstørrelsen ikke signifikant trykstyrken sammenlignet med foliationens hældning og kornformen. Stejlt folierede bjergarter i To-3, -5, -6 og -7 viser trykstyrker mellem 11 og 16 MPa, hvorimod det stejlt folierede salt i To-8, -9 og -10 viser styrker på 18-22 MPa. Brudfladerne viser sig typisk langs korngrænserne, hvorfor kornformen er en vigtig faktor.

To-8, -9 og -10 saltets større trykstyrke korrelerer med en lav deformationsgrad - lavt a/c forhold. Større trykstyrke korrelerer også med mindre elliptisk formfaktor EFF*. Derimod korrelerer To-6 saltets lavere trykstyrke med et højt a/c forhold og høj EFF*. Begge disse forhold kan føres tilbage til de stærkt "flattened" korn, som definerer et udtalt foliations- og spalteplan.

Stensaltprøver med mere fladtliggende krystalfoliation har høj vertikal trykstyrke uafhængig af deformationsgraden. Sådanne bjergarters styrke er afhængig af halitkrystallernes grad af krystallografisk orientering, fordi brudfrakturerne følger de to spalteredninger, der tenderer til at stå vinkelret på foliationsplanet. De hidtil opnåede data indicerer imidlertid ikke en stærkt foretrukken krystallografisk orientering i nogen af de undersøgte prøver og der kan således ikke forventes nogen større forskel i trykstyrkeværdierne.

2. STATISTISK ANALYSE AF STENSALTS MEKANISKE EGENSKABER.

Indledning.

Formålet med dette arbejde er at udvikle praktiske metoder til analyse af stensalts petrografiske og bjergartsmekaniske egenskaber på grundlag af avancerede statistiske metoder.

For at kunne vurdere saltets mekaniske egenskaber i forbindelse med gaskaverner er et stort antal data indsamlet fra

- geologisk klassifikation af saltprøver
- borehulslogging og
- mekaniske prøveresultater af saltprøver.

Den internationale viden og praksis angiver ikke nogen

enkel eller ensartet metode til behandling af disse data. Den viden, der er samlet i Danmark, demonstrerer tydeligt behovet for, at nye metoder bringes i anvendelse for at omsætte den store mængde data til karakteristiske konstruktionsparametre for gaskaverner.

Til studiet af saltets bjergartsmekaniske egenskaber er valgt to statistiske metoder, der bygger på en database af saltdata fra Tostrup saltdomen.

I princippet stiller metoderne det nødvendige objektive værktøj til rådighed for ekstrapolation af de bjergartsmekaniske data fra en mindre mængde saltprøver til hele den saltmasse, der er påvirket af en gaskaverne.

Analytiske metoder.

Indledning.

Formålet med en saltanalyse er at tilvejebringe et sæt karakteristiske relationer mellem bjergartsspændinger og -deformationer på forskellige spændingsniveauer, temperaturer etc.

Indenfor dette projekts grænser er benyttet nedenstående empiriske tilnærmelse:

- enkelte karakteristiske parametre, der beskriver saltets mekaniske egenskaber, f.eks. forskydningsstyrken og graden af krybning.
- forskellige parametre, der har indflydelse på ovennævnte parametre, f.eks. temperaturen og saltets texturelle opbygning.
- empiriske relationer mellem parametre er defineret med passende hensyn til teoretiske bånd og kvalitativ erfaring.

Hovedformålet med nærværende arbejde har været at finde metoder, der er egnede til at

- udpege vigtige parametre, der har indflydelse på en bestemt mekanisk parameter
- fremskaffe overslag over empiriske relationer mellem mekaniske parametre og basisparametre.
- fremskaffe overslag over empiriske parametre.

Hvis sådanne metoder findes, er der mulighed for at kunne forudsige mekaniske egenskaber ved at substituere fysiske egenskaber og forhold i saltet.

Saltparametre og materialemodeller.

Baseret på den internationale erfaring og til en vis grad styret af rådige data er der valgt en række parametre, der karakteriserer saltets mekaniske egenskaber.

De anvendte parametre er defineret i figur 6 og 7:

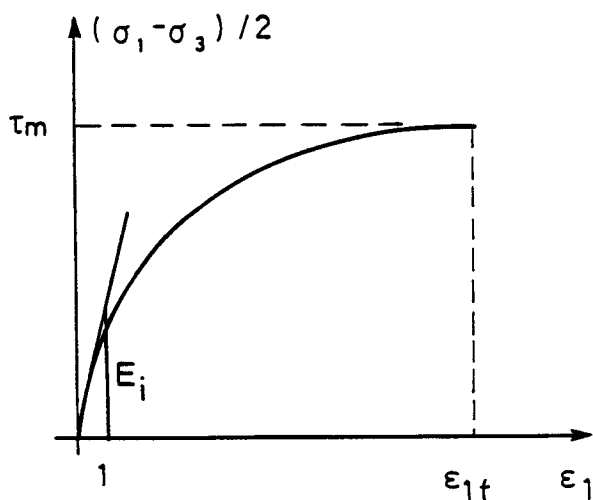


Fig. 6.

Deformation versus spænding.

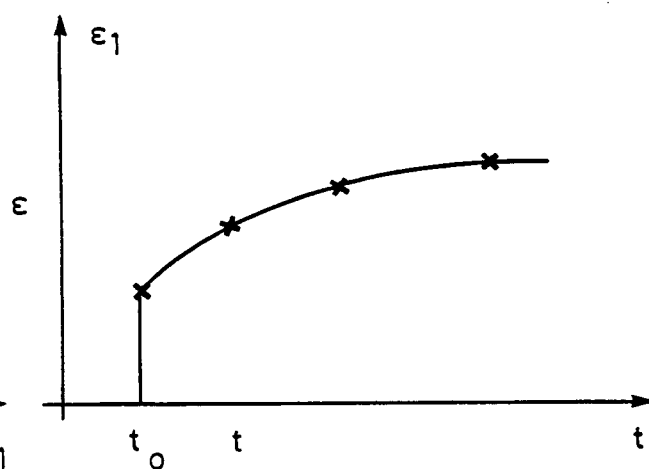


Fig. 7. Krybekurve.

Som for ovennævnte karakteristiske mekaniske parametre er der ud fra erfaringen valgt flere typiske basisparametre,

f.eks. middelspændingen i uniaxiale og triaxiale trykforsøg, saltkornenes elliptiske formfaktor, borehulsdiameterens afvigelse fra standarddiametere etc.

Empiriske modeller af stensaltets mekaniske adfærd.

Som et resultat af mange års bjergartsmekaniske studier af stensalts adfærd er der opstillet mange materialemodeller, hovedsaglig på grundlag af uniaxiale og triaxiale korttids og langtids tryk- og krybeforsøg.

I nærværende undersøgelse er anvendt Menzel-Schreiners krybelov og Burgers modificerede lineære krybelov.

Ikke-mekaniske saltkarakteristikas indflydelse.

Da der tidligere kun har været foretaget begrænsede undersøgelser af relationerne mellem ikke-mekaniske (petrografiske data, log-data etc.) og mekaniske karakteristika (styrke, stivhed etc.), forudsættes det, at der er simpel lineær relation mellem valgte petrografiske data og hver parameter i materialelovene.

Anvendte analytiske metoder.

Der findes forskellige statistiske metoder, der er særligt velegnede til analyse af prøveresultater. Flere af disse metoder, f.eks. analyse af varians og kovarians og lineær regressionsanalyse, er af forskellige grunde mindre egnede i den foreliggende undersøgelse. Følgende to metoder:

- korrelationsanalyse og

- almindelig regressionsanalyse

er fundet bedst egnet, fordi databasen er temmelig begrænset og af mere eller mindre tilfældig oprindelse.

Korrelationsanalyse.

Korrelationsanalysen giver et simpelt statistisk mål for afhængigheden mellem forskellige egenskaber.

Kvadratet på korrelationskoefficienten mellem to variable giver et overslag over den variansfraktion af den ene variable, der skyldes variationen af den anden variable.

Hvis alle kombinationer af karakteristiske salt egenskaber tages i regning, er det muligt statistisk at prøve afhængigheden mellem parameterpar og finde enhver signifikant korrelation, der kræver nærmere analyse.

Almindelig regressionsanalyse.

Ved hjælp af almindelig regressionsanalyse kan bestemmes de empiriske konstanter i forskydningsstyrken og krybningsadfærden.

Regressionsanalysen udføres i nedenstående trin:

- a. Forskydningsspændingen og den aksiale deformation beregnes i et krybningsforsøg som indgang til det generelle regressionsprogram LIC70.
- b. Fra databasen vælges observationer, der kan henføres til hver enkelt saltprøve, der er målt mekanisk og hvis nærmeste prøve er analyseret strukturelt.
- c. Hver observation vælges statistisk.
- d. Vægtfunktionen vælges kun på en kvalitativ basis, da der ikke kan trækkes detaljerede informationer ud af databasen.
- e. En række interaktive analyser foretages med det formål
 - at identificere egenskaber, der har indflydelse på saltets mekaniske egenskaber.
 - at vurdere empiriske konstanter og en oprindelsesfaktor, der er bestemt ved hjælp af regressionsanalyse for forsøg foretaget på Danmarks Tekniske

Højskole, idet oprindelsesfaktoren for tilsvarende forsøg udført på Lehrgebiet für Unterirdisches Bauen sættes lig med 1.

- f. En afsluttende analyse baseret på erfaringerne fra trin e omfattende
- bedste estimationer af signifikante empiriske konstanter
 - standardafvigelsen for hver konstant
 - den komplette regressionsanalyses statistiske elementer.

Datakilder.

Den saltdatabase, der er samlet som en del af saltforskningsprojektet, består udelukkende af resultater fra Tostrup gaskaverneprojekt.

Af praktiske grunde er kun data, der har været direkte til rådighed fra nedenstående kilder, medtaget i databasen:

Dansk Olie og Naturgas A/S:

Well Completion Reports
To-5, -6 og -7

Lehrgebiet für Unterirdisches Bauen:

Bjergartsmekanisk undersøgelse af To-5 - To-10.

Danmarks Geologiske Undersøgelse:

Resultater fra undersøgelse af saltets texturelle opbygning.

Danmarks Tekniske Højskole:

Korttids uniaxiale tryk- og krybningsforsøg.

Hovedvægten er lagt på resultater fra saltprøver, der har givet flest data omfattende

- korttids uniaxiale og triaxiale trykforsøg
- krybedata
- texturelle data
- log-resultater.

Det er umuligt at samle en database af passende størrelse, hvis alle data skulle være til rådighed for hver prøve. Heldigvis giver den benyttede analytiske metode mulighed for at tage højde for manglende data eller data med varierende signifikans, jævnfør den omtalte vægtningsprocedure.

Resultater.

Korrelationsanalyse.

Ved hjælp af statistiske prøver er signifikante korrelationer trukket ud af den meget store datamængde, som er resultatet af denne undersøgelse. Figur 8 viser de mest signifikante strukturelle egenskaber og den simple korrelationskoefficient r mellem den uniaxiale forskydningsstyrke og disse parametre.

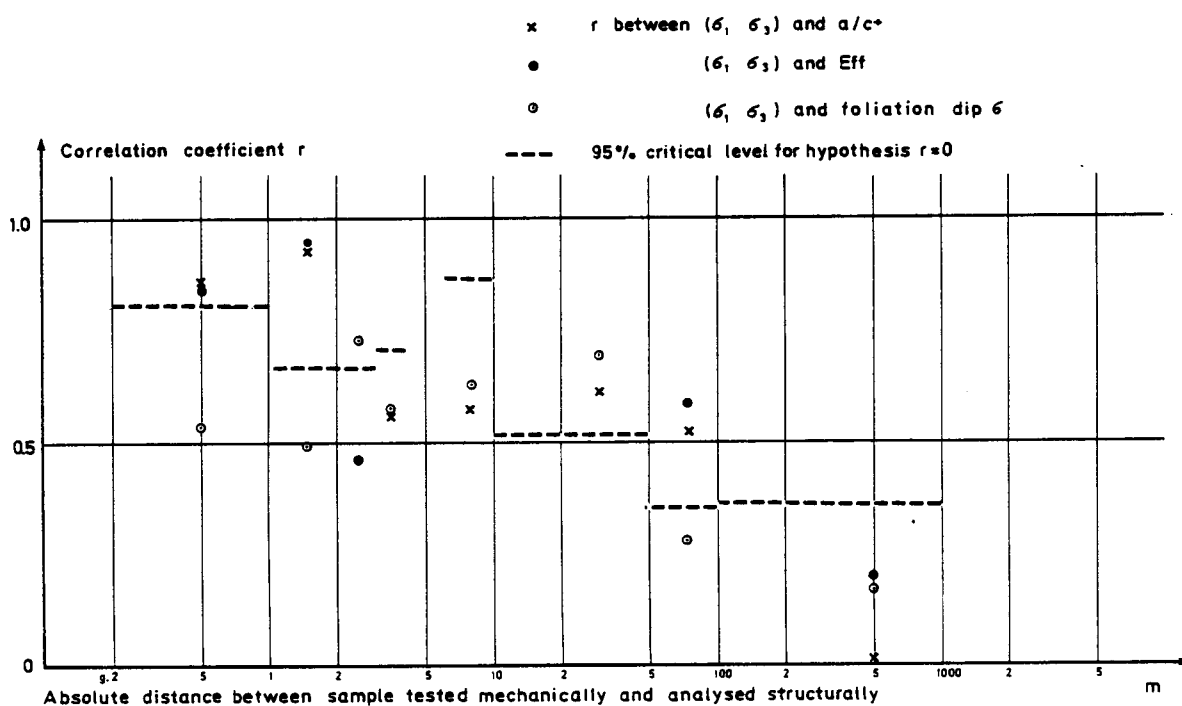


Fig. 8. Korrelationskoefficient mellem uniaxial trykstyrke og texturelle parametre.

Ud fra figur 8 kan der drages følgende konklusioner:

- korrelationskoefficienten r tenderer mod at aftage med stigende afstand mellem det mekanisk prøvede prøve-

stykke og den texturelt undersøgte prøve. Der er dog ikke nogen signifikant aftagen, hvis denne afstand er under 50 m.

- dette resultat indicerer, at grænsen for ekstrapolation af de saltegenskaber, der er målt et bestemt sted i saltdomen, er omkring 50-100 m i vertikal retning. Databasen giver ikke data for en tilsvarende korrelation i horisontal retning.
- de texturelle parametre EFF og a/c^* tenderer mod at have større signifikant indflydelse på saltets styrke end foliationens hældning.

Blandt de texturelle parametre findes den mest signifikante korrelation mellem krystalaksernes længde, den gennemsnitlige krystalperimeter og de målte formfaktorer. Korrelationskoefficienterne er positive, hvilket betyder, at strakte "flattened" krystaller giver mindre styrke end "sfæriske" krystaller. Der er ikke fundet nogen korrelation mellem trykstyrken og foliationens hældning, hvilket understøtter resultaterne fra de triaxiale prøver, der viser ingen eller kun ubetydelig indflydelse af hældningen. Korrelationsanalysen viser, at kvantitative resultater brugelige til kavernekonstruktion ikke er fundet.

Regressionsanalyse.

Denne analyse giver kvantitative og nogle kvalitative resultater baseret på korrelationsanalysens resultater.

Selv om texturelle data ikke specifikt er relateret til de enkelte prøvestykker, der er mekanisk trykprøvede, er regressionsanalysen delt i nedenstående to dele.

Saltstyrke versus salttextur. Kun bidrag med en signifikant statistisk indflydelse på forskydningsstyrken er anvendt i analysen. Korrelationskoefficienten er 0.996, hvilket betyder, at 99.6% af variansen på den endelige forskydningsstyrke forklares med prøvestykkets

variationer på de texturelle parametre, oprindelsesfaktoren og middelspændingen. Standardafvigelsen for forskydningspændingen er beregnet til 0.88 MPa.

Figur 9 viser fordelingen af de relative differencer mellem målte og beregnede forskydningsstyrker fra alle de prøver, der har været anvendt i analysen.

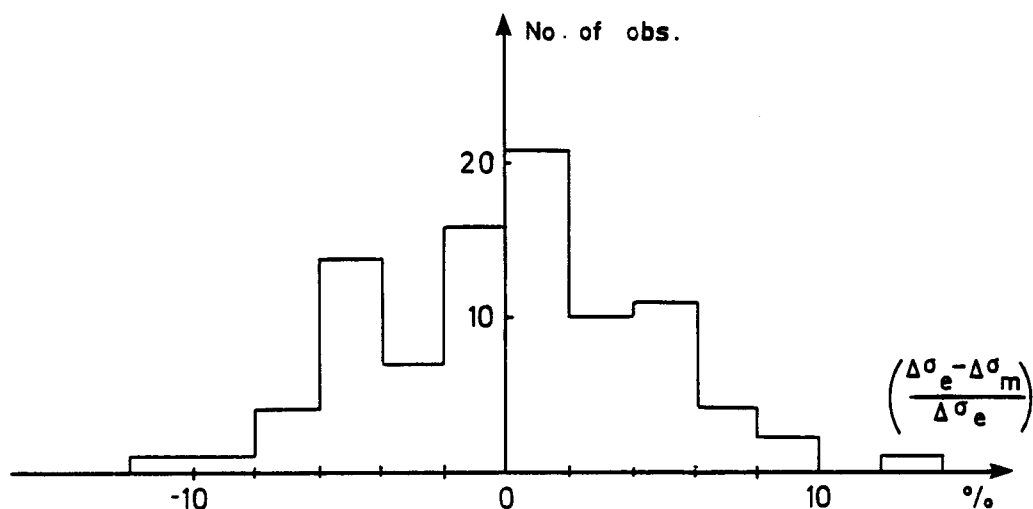


Fig. 9. Fordelingen af den relative difference mellem den målte og den estimerede forskydningsstyrke fra alle analysens prøver.

Saltstyrke versus log-resultater. I stedet for at relatere saltstyrken til de texturelle parametre, der ikke direkte er relateret til det samme prøvestykke som de målte styrkedata, er der anvendt log-resultater fra fire logs. Korrelationskoefficienten er 0.998 og standardafvigelsen er 0.68 MPa. Skønt resultatet ikke er væsentligt bedre, kan differencen klart henføres til de texturelle parametres relation til de målte styrkedata.

Krybeadfærden.

Da antallet af krybeforsøg er meget begrænset, passer analyseresultaterne ikke ret godt sammen med den almindelige erfaring. Anvendes log-resultaterne, er korrelationskoefficienten beregnet til 0.98 og standardafvigelsen til 0.039 på krybedeformationen. Resultaterne synes rimelige men stadig ikke acceptable med hensyn til kavernekonstruktion.

Konklusioner.

Det analytiske arbejde demonstrerer såvel korrelations-
som regressionsanalysens muligheder.

På grund af forskellige begrænsninger af kvaliteten og
kvantiteten af de rådige data dækker de endelige
resultater ikke alle aspekter af saltets adfærd.

Regressionsanalysen har givet resultater, der kan
anvendes til konstruktionsformål hvad angår saltstyrken,
men kun for Zechstein 2 saltet og kun i Tostrup domén.

Analysen introducerer nogle nye aspekter i brugen af
forskellige typer data fra saltdomén.

Saltets styrkeegenskaber kan kvantitativt korreleres med
andre saltdata, hvilket betyder, at den store mængde data
(f.eks. log-data) kan udnyttes meget mere direkte end
hidtil i analyser af kaverners adfærd.

KAPITEL 3

1. MIKROTERMOMETRISKE UNDERSØGELSER AF HALIT OG KVARTSKRYSTALLER FRA SALTDOMER I JYLLAND

Af Johannes Fabricius

2. NATURLIG CARNALLITS TERMALE STABILITET I COGNATE GEOLOGISKE MILJØER

Af Johannes Fabricius

3. FREMTIDIGE ARBEJDER

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. MIKROTERMOMETRISKE UNDERSØGELSER AF HALIT OG KVARTSKRYSTALLER FRA SALTDOMER I JYLLAND. Johannes Fabricius.	65
Indledning	65
Mikrotermometri på halit	66
Termometri	67
Kryometri	68
Mikrotermometri på kvartskrystaller	69
Kvartskrystallerne	69
Faste indeslutninger	70
Væskeindeslutningerne	70
Kryometri	71
Termometri	71
Konklusioner	76
2. NATURLIG CARNALLITS TERMALE STABILITET I COGNATE GEOLOGISKE MILJØER. Johannes Fabricius.	77
Indledning	77
Mikrotermometri på carnallitindeslutninger i kvartskrystaller	77
Det recente og det fossile miljø	78
Mikrotermometri	78
Kryometri	79
Termometri	80
Konklusioner	80
3. FREMTIDIGE ARBEJDER	81

KAPITEL 3.

1. MIKROTERMOMETRISKE UNDERSØGELSER AF HALIT OG KVARTS- KRYSTALLER FRA SALTDOMER I JYLLAND.

Indledning

Disse undersøgelsers to hovedformål var dels at bestemme den kemiske sammensætning og saliniteten af de opløsninger (brines), der findes som indeslutninger og som brine lommer i domesaltet og dels at finde en metode egnet til identifikation af de to grå salttyper Zechstein 1, (Na1) og Zechstein 2, (Na2).

Undersøgelsen af halit (NaCl) blev foretaget på spaltestykker af klare halitkrystaller fra boringen Erslev 1 i Morsdommen, medens kvartskrystallerne blev separeret fra saltkærner fra boringen 1A i Batumdomen. Prøverne blev taget i salt, der med sikkerhed vides at være enten Na1 eller Na2.

Når et mineral (f.eks. halit eller kvarts) krystalliserer i en vandig opløsning, indfanges noget af brinen, der så danner væskeindeslutninger i mineralet.

En vigtig forudsætning for anvendelsen af den mikrotermometriske metode er, at den undersøgte indeslutning er primær, det vil sige dannet under krystallisationen af den samme brine, som mineralet udkrystalliserede fra.

Sekundære indeslutninger kan dannes, hvis der måske flere millioner år senere opstår en sprække i mineralet, der heles ud fra en anden brine og under andre fysiske tilstande end under den primære krystallisation. Sådanne helede sprækker er yderst sjældne i kvartskrystallerne men kan let forekomme i halit, der tillige kan være rekrystalliseret flere gange efter den primære krystallisation i Perm.

Krystallerne blev dannet fra en brine under bestemte tryk- og temperaturforhold og med en bestemt kemisk sammensætning. Ved brug af den mikrotermometriske undersøgelsesmetode er det undertiden muligt at bestemme disse PTX værdier for væskeindeslutningerne med stor nøjagtighed. Metoden falder i to dele: 1. Kryometri. Nedkøling af indeslutningen for at bestemme frysepunktssænkningen og smeltetemperaturerne for de dannede hydrater, der er udtryk for brinens saltholdighed og sammensætning og 2. Termometri. Opvarmning af indeslutningen til total homogenisering, hvilket vil sige til een (væske-) fase, hvorved dannelsesstemperaturen og -trykket kan bestemmes.

Når værtskrystallen med væskeindeslutningen efter dannelsen kommer op i højere niveauer, f.eks. ved diapirisme eller i laboratoriet, bliver den afkølet. Herved trækker væsken i indeslutningen sig mere sammen end værtskrystallen og der dannes en gasboble bestående af mættede dampe under mættede dampes tryk på den pågældende temperatur og salinitet. Hvis væsken var mættet med NaCl på den højere dannelsesstemperatur, vil der dannes en NaCl-krystal, normalt en terning, når væsken bliver koldere, fordi væsken kan opløse mere NaCl, når den er varm end når den er kold.

I dette saline miljø, som væskeindeslutningerne repræsenterer, består brinen af CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl og KCl samt en del andre stoffer af underordnet betydning. Hovedkomponenterne er CaCl_2 og MgCl_2 , hvis samlede koncentration bestemmer koncentrationen af NaCl og KCl i opløsningen. Eftersom bjergarten er halit med få procent anhydrit, vil brinen altid og under alle forhold være mættet med hensyn til NaCl. Dette forhold udnyttes til bestemmelse af kvartskrystallernes dannelsesstemperatur, der må være lig med smeltetemperaturen/opløsningsstemperaturen for den NaCl-terning, der eventuelt er til stede i indeslutningen.

Mikrotermometri på halit.

Halitprøverne blev fremstillet af spaltestykker fra store

farveløse krystaller fra udvalgte kærner fra boringerne E1 og E2 i Morsdomen. Prøverne blev dobbeltpolerede og skåret i 1x4x4 mm store stykker.

De benyttede væskeindeslutninger antages alle at være primære, fordi de enten er store isolerede eller danner korte rækker af små indeslutninger. Hovedparten af indeslutningerne er negative (hule) terninger med kantlængde på 10-12 μm . Små terninger er talrige og terninger med kantlængde større end 50 μm er sjældne. På grund af halits kemo-fysiske egenskaber kunne den mikrotermometriske normalprocedure begyndende med kryometri efterfulgt af termometri ikke følges.

Under nedfrysningen dannes der is og hydrater i indeslutningen, hvilket bevirker dannelse af mikrosprækker i forlængelse af indeslutningens vægge. Når is og hydrater smelter, trænger noget af væsken ud i disse sprækker, således at den påfølgende termometri vil vise for høje homogeniseringstemperaturer.

Termometri.

Opløseligheden af NaCl i $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ brinen stiger med stigende temperatur. Det er derfor vigtigt, at opvarmningen foregår meget langsomt, således at der til stadighed er kemisk ligevægt i væsken. Efter at homogeniseringstemperaturen T_h er opnået, det vil sige når gasboblen er forsvundet, stiger trykket ca. 11 bar pr. $^{\circ}\text{C}$ over T_h . Dette bevirker, at indeslutningen deformeres og bliver vedvarende større, hvorved bestemmelsen af T_h bliver fejlagtig.

Homogeniseringstemperaturerne blev bestemt i følgende to intervaller:

28.5 $^{\circ}\text{C}$ - 124.8 $^{\circ}\text{C}$, middel $T_h = 72.6^{\circ}\text{C} \pm 5.9^{\circ}\text{C}$, n=68
189.8 $^{\circ}\text{C}$ - 223.2 $^{\circ}\text{C}$, middel $T_h = 203.2^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$, n=23

For at beregne dannelsesstemperaturen, T_t for halitens krystallisation skal homogeniseringstemperaturen korrigeres for det tryk, der herskede under krystallisationen. For T_h -værdier under $50-60^\circ\text{C}$ er trykkorrektionen uden betydning.

Bestemmelse af trykket under dannelsen af de indeslutninger, der har T_h højere end 60°C , er ikke mulig, fordi indeslutningerne kan være dannet på et hvilket som helst tidspunkt mellem den første krystallisation under sedimentationen og den post-diapiriske fase, ja selv under boreproceduren og prøvepræparationen kan der dannes indeslutninger.

Temperaturerne i intervallet $189.8^\circ\text{C} - 223.2^\circ\text{C}$ er uacceptabelt høje og ukorrekte. De kan ikke benyttes til bestemmelse af dannelsesstemperaturerne.

Kryometri

På grund af en normalt stor metastabilitet i væskeindeslutningerne bliver frysepunktsænkningen ikke målt "fra oven" men isens smeltepunkt $T_{m, \text{is}}$ bliver efter kraftig nedkøling målt "fra neden". Prøven bliver kølet ned til $-90 - -110^\circ\text{C}$, hvilken temperatur opretholdes i 10-20 minutter. Ved derefter at hæve temperaturen langsomt til $-50 - -60^\circ\text{C}$ sker der i de fleste indeslutninger en spontan is- og hydratdannelse. Isens smeltepunkt $T_{m, \text{is}}$ blev målt på 75 indeslutninger i intervallet $-51^\circ\text{C} - -25^\circ\text{C}$ med en middeltemperatur på $-37.6^\circ\text{C} \pm 1.8^\circ\text{C}$. Disse temperaturer viser, at der ud over NaCl er CaCl_2 og MgCl_2 til stede. Eftersom indeslutningens vægge består af NaCl, dannes der uforholdsmæssigt meget NaCl-hydrat, hvilket bevirker, at smeltepunkterne for de vigtige MgCl_2 - og CaCl_2 -hydrater som regel ikke kan bestemmes. I 7 tilfælde var det dog muligt at bestemme MgCl_2 -hydratets smeltepunkt og dermed, ved anvendelse af passende fasediagrammer, en omtrentlig sammensætning af brinen i væskeindeslutningerne.

Saliniteten er bestemt til 35-40 vægt% og forholdet mellem CaCl_2 og MgCl_2 fra 2.5:1 til 1:3. Ved 20°C er NaCl-indholdet mindre end 2 vægt%.

Den anslåede kemiske sammensætning udelukker enhver anden oprindelse end havvand, der er højt koncentreret i halit-facies.

Undersøgelsen har vist, at halit er mindre egnet til mikrotermometriske studier.

Mikrotermometri på kvartskrystaller.

Det har længe været kendt, at der findes velformede kvartskrystaller i højsaline miljøer. Sådanne kvartskrystaller bruges som facies-indikatorer for salin indflydelse på sedimenter i nærheden af saltforekomster.

I NV Tyskland har tilsvarende kvartskrystaller fra saltforekomster med held været anvendt lokalt som et stratigrafisk værktøj, idet forskelle i akseforhold, farve, habitus m.m. har vist sig at være signifikant for saltforekomster af forskellige aldre.

Det var derfor nærliggende at undersøge kvartskrystallerne fra Z1 og Z2 fra boringen 1A i Batundomen. Men det viste sig, at der ikke var iøjnefaldende ydre forskelle mellem krystallerne fra de to cykler. Følgelig blev der foretaget en mikrotermometrisk undersøgelse af væskeindeslutningerne i krystallerne.

Kvartskrystallerne.

Krystallerne er velformede (euhedrale) i alle overgange fra sekskantede bipyramider uden prismer til langprismatiske former med ditrigonale pyramider. Længden af krystallerne går fra få μm til 1.4-1.6 mm. Krystallerne er farveløse og gennemsigtige og overfladerne er glatte.

Antallet af krystaller pr. 500 g. kærnemateriale varierer fra meget få til nogle få hundrede.

Faste indeslutninger.

I kvartskrystallerne findes op til 4-6 små klastiske, vel afrundede kvartskorn, der kan have virket som krystallisationskim. Kornene er altid omgivet af en tynd hinde af mild brine.

Anhydritkrystaller forekommer på to måder:

- a. enkelte velformede rombiske krystaller tilfældigt spredt i kvartskrystallen
- b. meget stort antal små, svagt afrundede og tynde rombiske krystaller dannende en poikilitisk struktur (si-struktur) i kvartskrystallen.

Den sidstnævnte forekomstmåde er sjælden. Den poikilitiske struktur menes at være dannet ved samtidig krystallisation af kvarts og anhydrit under sedimentationen af saltet.

Væskeindeslutningerne.

Væskeindeslutningerne forekommer enten som isolerede store regulære indeslutninger af form som værtskrystallen og i krystallografisk orientering med denne eller som populationer af irregulære, meget tynde store og små indeslutninger på en krystallografisk flade inde i kvartskrystallen. De sidstnævnte indeslutninger er langt de talrigeste.

Den alt overvejende part af indeslutningerne er rene gas-væske indeslutninger uden dattermineraller. I enkelte af de største indeslutninger findes en halit-terning og i meget få tilfælde tillige en sylvin-terning (KCl) som dattermineraller.

Størrelsen af indeslutningerne går fra under 1 μm til 25-30 μm for enkelte indeslutninger. Gennemsnitlængden af brugelige indeslutninger er under 10 μm .

Kryometri.

Kun meget få af de største indeslutninger nukleerede is og/eller hydrat under fryseløbene, selv om temperaturen blev holdt på -125°C i op til 20 minutter. Dette forhold er udtryk for, at brinen er meget ren uden nukleationskim.

Da væsken i indeslutningerne er højt koncentrerede CaCl_2 - MgCl_2 opløsninger mættet med hensyn til NaCl blev følgende fasediagrammer benyttet:

CaCl_2 - NaCl - H_2O , MgCl_2 - NaCl - H_2O , CaCl_2 - MgCl_2 - H_2O samt tre fasediagrammer i systemet $(\text{CaCl}_2+\text{MgCl}_2)$ - NaCl - H_2O med $\text{Ca}:\text{Mg}$ forholdene 3:1, 1:1 og 1:3. Fasediagrammerne stammer fra ældre russisk litteratur.

Saliniteten er bestemt til at være fra 35 til over 45 vægt% med $\text{Ca}:\text{Mg}$ forhold fra 3:1 til 1:4. NaCl -indholdet er skønnet til 1-8 vægt% afhængig af indfangningstemperaturen og $\text{CaCl}_2+\text{MgCl}_2$ koncentrationen. De målte koncentrationer er i smuk overensstemmelse med kemiske analyser foretaget på brinelommer i domesaltet, f.eks. boring 8 i Suldrupdomen:

	salinitet	NaCl	KCl	CaCl_2	MgCl_2
vægt%	31	4	4	15	8

foruden spor af jod, ammonium, bor og sulfat samt et usædvanligt højt indhold af bromioner (0.42 vægt%).

Analysen blev foretaget ved 20°C , hvorfor brinen in situ ved højere temperaturer vil optage NaCl fra sidestenen. Ved 20°C blev pH målt til 3.18, hvilken surhedsgrad vil stige med stigende temperatur in situ.

Termometri.

Homogeniseringstemperaturen T_h blev bestemt for 226 væske-gas indeslutninger, der alle homogeniserede i væskefasen, figur 1.

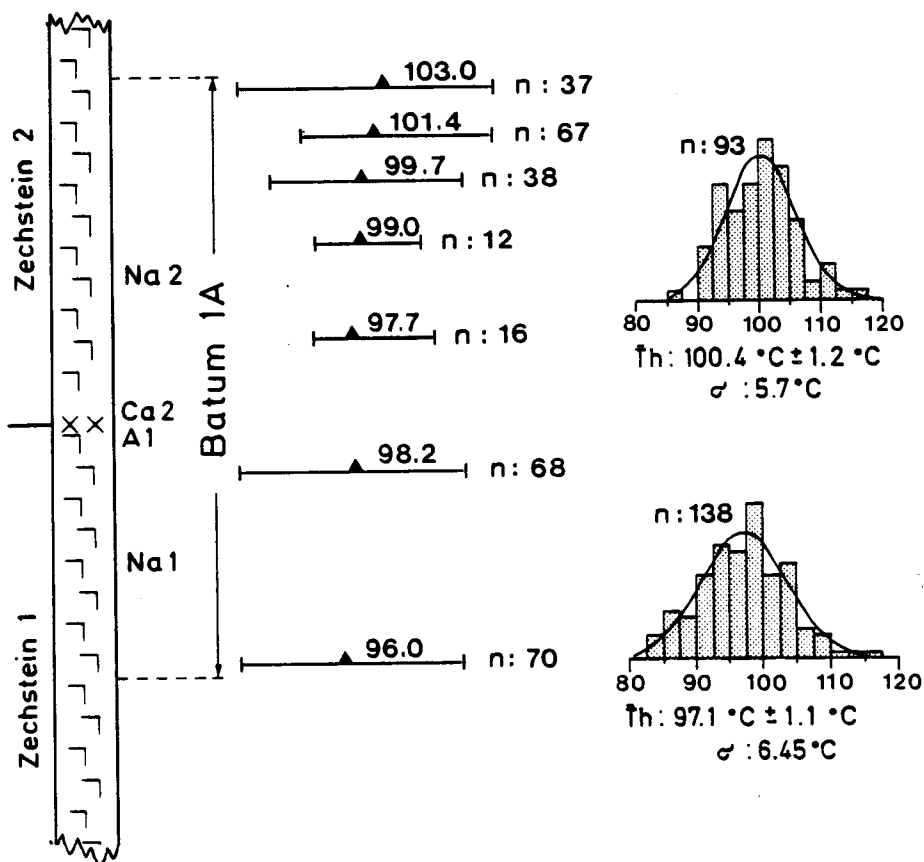


Fig. 1. Homogeniseringstemperaturer for 231 2-fase indeslutninger.

Middeltemperaturerne for de angivne populationer ses at stige jævnt fra 96.0 °C nederst i Zechstein 1 til 103.0 °C øverst i Zechstein 2 i Batum 1A. Denne tydelige tendens skyldes måske statistiske unøjagtigheder og kan ikke lægges til grund for en stratigrafisk bestemmelse af det pågældende salt.

Enkelte store indeslutninger er 3-fase indeslutninger, der foruden væske og gas-boble tillige indeholder en halitterning. Da brinen under alle forhold op til halitterningens smeltetemperatur $T_{m,ha}$ vil være mættet med hensyn til NaCl, vil $T_{m,ha}$ være lig med indeslutningens indfangningstemperatur T_t , der er lig med kvartskrystallens dannelsesstemperatur.

Når gasboblens forsvindingstemperatur T_h og T_t er kendt, kan trykket P under kvartskrystallens dannelse beregnes og dermed mægtigheden d af de overliggende sedimenter i dannelsesøjeblikket, tabel I.

Krystal nr. 15.7 - 10.5 tilhører Zechstein 2 og nr. 8.3

- 1.7 tilhører Zechstein 1. De forholdsvis høje dannelsesstemperaturer T_t kan antagelig føres tilbage til efterdønninger efter den permiske vulkanisme, der er veldokumenteret i det Danske Trug.

Krystal nr. 13.6 påkalder sig særlig opmærksomhed, fordi der er stærke indikationer på, at den er dannet under

X nr.	T_t °C	P MPa	d km
15.7	141	45	2.0
13.6	180	93	4.0
12.3	154	79	3.4
11.1	161	71	3.1
10.10	152	55	2.4
10.8	124	20	0.9
10.5	140	43	1.9
8.3	141	43	1.9
8.2	112	14	0.6
7.14 ^I	140	50	2.2
7.14 ^{II}	158	79	3.4
3.11	164	68	3.0
1.8	135	32	1.4
1.7	165	75	3.3

TABEL I.

diapirismens begyndelsesfase. Flydning af saltet og diapirisme (domedannelse) er afhængig af trykket og i særlig grad af temperaturen, der har afgørende indflydelse på saltets viskositet.

Mulighederne for diapirisme, hvilket vil sige vertikal materialetransport i saltet, er blevet udtrykt ved det såkaldte Rayleigh-tal. Hvis det beregnede Rayleigh-tal R væsentligt overskrider det kritiske Rayleigh-tal R_c , er der sandsynlighed for termal konvektion lig med vertikal materialetransport. Disse beregninger er gældende for tørt salt. Men det pågældende salt var "vådt", hvilket fremgår af, at kvartskrystallerne er udkrystalliseret fra brine i saltet. Viskositeten for "vådt" salt er

væsentligt lavere end tørt salt og Rayleigh-tallet bliver tilsvarende større.

Det beregnede Rayleigh-tal for saltet omkring krystal nr. 13.6 er mere end 75% højere end det kritiske Rayleigh-tal.

Nr. 13.6 er stratigrafisk placeret ca. 100 m oppe i Zechstein 2. I de underliggende ca. 600 m salt har mulighederne for termal konvektion været endnu bedre på grund af den højere temperatur, det højere tryk og fordi saltet er "vådt".

Den beregnede sedimentmægtighed d over nr. 13.6 viser, at krystallen blev dannet i sen Trias - tidlig Jura efter at diapirismens penetrationsfase var begyndt. Dette begyndelsestidspunkt er flere millioner år tidligere end hidtil antaget.

Den første fase i en diapirs udviklingshistorie er pudestadiet, under hvilket salt fra omgivelserne flyder ind i puden. Saltet er ikke længere horizontalt lagdelt salt og ovennævnte konvektionsmodel kan næppe anvendes i pudestadiet.

Men de målte dannelsesstemperaturer og dannelsesstryk (tabel I) kan benyttes til andre modeller for den diapiriske udvikling. Saltet bliver mobiliseret, når trykket overstiger ca. 40 MPa. I diagrammet figur 2 er de undersøgte krystaller samlet i grupperne I, II og III. Alle krystallerne blev fundet i den samme saltmasse i boringen Batum 1A 300-600 m under saltspejlet. Krystallerne er dannet individuelt på et tidspunkt, hvor de sammenhørende tryk og temperaturer har været som anført i tabel I.

Krystallerne i gruppe I (fig 2) omfattende 56 krystaller er dannet i sen Zechstein - tidlig Trias. På intet senere tidspunkt har der været sammenfald mellem tryk og temperaturer som anført i diagrammet.

Krystal nr. 13.6 kan være dannet i perioden fra sen

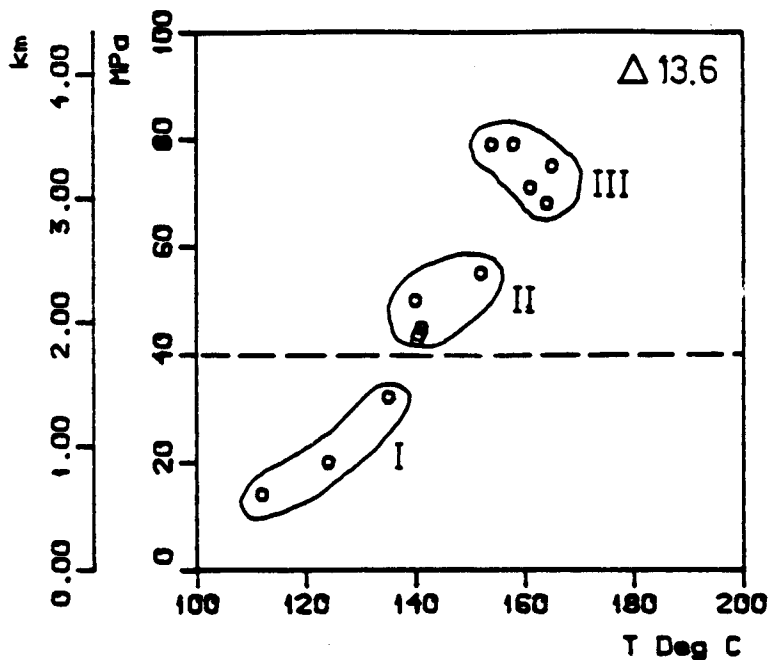


Fig. 2. Kvartskrystallernes krystallisationsbetingelser.
T versus P.

Trias til tidlig Tertiær. Hvis krystallen blev dannet i sen Kridt - tidlig Tertiær, er krystallen og den omgivende saltmasse hævet ca. 3000 m i løbet af 60-70 millioner år. Der kan derfor være tale om, at diapirismen fortsatte i Tertiær og at der stadig forekommer bevægelser i saltet. Hvis nr. 13.6 blev dannet i diapirismens hovedfase i begyndelsen af Kridt ca. 1000 m over basement, er det nødvendigt, at der foregik væsentlige saltbevægelser i Tertiær for at bringe krystallen op til dens findested ca. 500 m under saltspejlet.

Tilsvarende argumenter kan anvendes på krystallerne fra gruppe II og III. Krystallerne kan være dannet på et vilkårligt tidspunkt i perioden tidlig Jura - mellem Tertiær, da temperatur og tryk var i overensstemmelse med de målte data.

Konklusioner.

De i saltdomerne værende opløsninger i brinelommer, interstitielt og som væskeindeslutninger er højsaline CaCl_2 - MgCl_2 - NaCl opløsninger med høj surhedsgrad.

De målte og beregnede data indikerer, at de fysiske og kemiske miljøer under sedimentationen, diagenesen og den tidlige diapirisme har været ens for de to evaporitcykler Zechstein 1 og 2.

De højest målte Rayleigh-tal indikerer, at diapirismen er begyndt i sen Trias - tidlig Jura, mange millioner år tidligere end hidtil antaget.

De højest målte krystallisationstemperaturer med sammenhørende tryk viser, at diapirismen kan være fortsat ind i Tertiær og at saltbevægelserne stadig kan foregå.

En tilsyneladende stigning af homogeniseringstemperaturen fra Zechstein 1 op i Zechstein 2 har ikke stratigrafisk signifikans.

Mikrotermometriske målinger på halit er ikke pålidelige og salinitetsbestemmelser kan kun give svage tendenser.

2. NATURLIG CARNALLITS TERMALE STABILITET I COGNATE GEOLOGISKE MILJØER.

Indledning.

Det er af meget stor vigtighed at kunne beregne sikkerhedsafstande fra varmeproducerende affald i saltdomer til carnallitførende bjergarter.

Carnallit - $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - vil afgive krystalvandet - dehydrere -, når mineralet opvarmes. Denne dehydrering er trykafhængig, således at dehydreringstemperaturen stiger med stigende tryk.

Indtil to tyske forskeres (Kern & Franke, 1981) forsøg har kendskabet til carnallits termale stabilitet været begrænset til atmosfæretryk eller vacuum betingelser. Kern & Frankes forsøg blev udført med røntgendiffraction på ren carnallit under tryk op til 15 MPa og temperaturer op til 200°C . For at bestemme dehydreringsbetingelserne in situ er det nødvendigt at foretage målinger i et lukket system under in situ betingelser, således at der kan etableres en dynamisk ligevægt.

Nærværende undersøgelse er foretaget på naturlig carnallit i lukkede systemer i det naturlige miljø under in situ betingelser på tryk op til 80 MPa og temperaturer over 200°C .

Mikrotermometri på carnallitindeslutninger i kvartskrystaller.

Carnallitførende væskeindeslutninger i kvartskrystaller fra kaliførende bjergartssekvenser er lukkede kemiske systemer, der opfylder in situ betingelserne. Væskeindeslutningerne selv er naturlige visuelle

autoklaver, i hvilke et forud fastlagt vilkårligt tryk inden for vide grænser kan opbygges gennem styret opvarmning af kvartskrystallen.

Kvartskrystallerne blev separeret fra kaliførende bjergarter fra Mors og Tostrup domerne. Krystallerne er alle af den langprismatiske type og de er meget talrige sammenlignet med det "grå salt" Na1 og Na2.

De carnallitførende indeslutninger forefindes enten som små irregulære indeslutninger med størrelse op til ca. 25 μm eller som store uregelmæssige, isolerede indeslutninger med \emptyset over 75 μm . Carnallit er med sikkerhed identificeret på de optiske og mineralogiske karakteristika.

Det recente og det fossile miljø.

Det recente miljø in situ er fastlagt ved de tilstedeværende mineraler (mineralparageneser) og ved kemiske analyser af kernematerialet.

Det fossile miljø, da kvartskrystallerne blev dannet for et par hundrede millioner år siden, er bestemt ved de mineraler, der er fanget som faste indeslutninger af kvartskrystallerne under deres dannelse samt ved kemisk analyse (kryometri) af opløsningerne i væskeindeslutningerne.

Følgende mineraler etc. er fælles for de to miljøer: Halit, sylvin, carnallit, kieserit, anhydrit, Fe-magnesit, pyrit, kvarts, ferrioxidater, leret materiale, kvartskorn, glimmer.

Det kan derfor fastslås, at det fossile geokemiske miljø ikke adskiller sig signifikant fra det recente miljø in situ. Som følge af coeksistensen af pyrit og magnesit må pH-værdien være mellem 6.4 og 7.7.

Mikrotermometri.

Der er udført mikrotermometriske målinger på carnallitførende indeslutninger og på halitførende

indeslutninger efter de principper, der er omtalt i kapitlets første afsnit.

Kryometri.

Ved brug af fasediagrammet $\text{MgCl}_2\text{-KCl-H}_2\text{O}$ mættet med hensyn til NaCl er saliniteten bestemt til intervallet fra 35 vægt% til mere end 50 vægt%. Opløsningerne er en MgCl_2 -opløsning mættet med hensyn til carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) og halit (NaCl) ved 20°C . I enkelte tilfælde er opløsningerne tillige mættet med hensyn til sylvin (KCl).

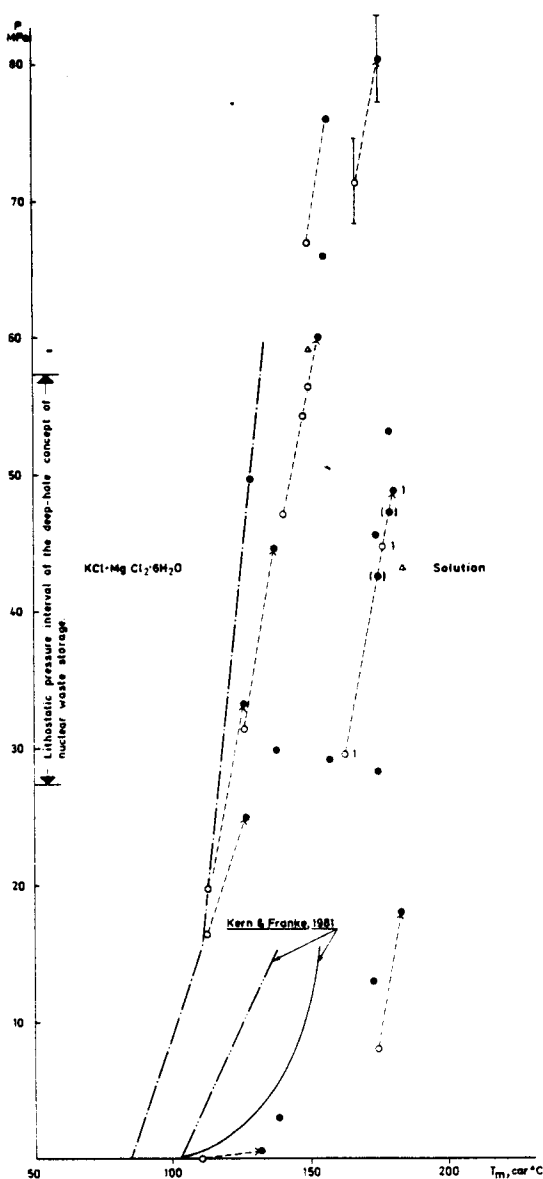


Fig. 3. Carnallits smeltetemperaturer versus det beregnede tryk. Udfyldte cirkler repræsenterer endelig smeltning og åbne cirkler partiel smeltning. Åbne trekanter repræsenterer krystallisationstemperaturer og -tryk for 2 kvartskrystaller.

Termometri.

Gasboblens forsvindingstemperatur T_h og de successive smeltetemperaturer for carnallit $T_{m,car}$ er målt på 38 indeslutninger og de tilsvarende tryk er beregnet, fig. 3.

Det viste sig, at sammensatte korn og tvillinger smeltede successive korn for korn på forskellige temperaturer. Det viste sig tillige, at ca. en trediedel af enkeltkornene smeltede under mættede dampes tryk, hvilket vil sige før gasboblen var forsvundet, i temperaturintervallet 84-120 °C.

Kvartskrystallernes dannelsesstemperatur og -tryk er målt og beregnet til minimum 180 °C henholdsvis 60 MPa.

KONKLUSIONER.

Naturlig carnallits termale stabilitet i cognat geokemisk miljø stiger med stigende tryk og smelteintervallet snævrer ind. .

Hvis der ses bort fra carnallit, der smelter under mættede dampes tryk, har det vist sig, at carnallits dehydrering begynder på meget lavere temperaturer end hidtil antaget.

Carnallits termale konditioner (herunder dehydrering under mættede dampes tryk) skal nødvendigvis tages i regning, når sikkerhedsafstande fra varmeproducerende affald i miner eller dybe boringer skal beregnes.

Som følge af de forholdsvis få målinger kan en smeltekurve ikke etableres og resultaterne kan ikke behandles statistisk på en tilfredsstillende måde.

Det må antages, at de gjorte observationer af naturlig carnallits opførsel i et lukket system med stigende tryk og temperatur er udtryk for en utilstrækkelig forståelse af in situ adfærdens natur.

3. FREMTIDIGE ARBEJDER.

Det tjener intet formål at fortsætte de mikrotermometriske undersøgelser af indeslutninger i halit.

Eftersom de mikrotermometriske undersøgelser af kvartskrystaller kun er foretaget i Batumdomens boring 1A, der stratigrafisk kun dækker ca. 100 meter af det øverste Zechstein 1 salt og det nederste Zechstein 2 salt, bør tilsvarende undersøgelser udføres på andre domer, f.eks. Tostrup, Suldrup og Mors, der omfatter langt større afsnit af Z1 og Z2.

I forbindelse med separationen af kvartskrystallerne fra den uopløselige rest bør denne samtidig beskrives petrografisk, idet det har vist sig - i materiale fra Tostrup domen -, at der optræder karakteristiske horisonter af stratigrafisk betydning hvad angår indholdet af kvartskrystaller, anhydrit og kieserit samt kvartskrystallernes habitus, størrelse og indhold af væskeindeslutninger.

Undersøgelsen af naturlig carnallits termale stabilitet i det cognate miljø bør fuldendes ved målinger på det omfattende prøvemateriale, der forefindes klargjort ved DGU.

ENGLISH SUMMARY

PREFACE

The Salt Research Project EFP-81 was established at the Geological Survey with reference to the Ministry of Energy, file no. 221-80, 1981-04-23.

The main purpose of the project was to procure a profound insight of the inner structure of Danish salt domes, the mineralogical composition and the characteristics of the rock salt.

The project composed of structural analysis of the salt domes and additional study of the salt from different wells, including fabric analysis, petrography, microthermometry, mineralogy and metamorphosis.

The project was commenced 1981-07-01 and was terminated with reports 1983-12-31.

The daily leadership of the project was performed by geologist Johannes Fabricius during the entire period. The coworkers were geologist Jørgen Gutzon Larsen (1981-07-01 to 1983-06-30) and geologist Niels Springer (1983-03-21 to 1983-06-30). Engineer Per Lagoni, LICconsult, has worked out a statistical report. Geologist Fritz Lyngsie Jacobsen was a representative of the Survey during the entire period.

Student Martin Sønderholm and the laboratory workers Marga Jensen and Gert Grønning were associated with the project.

The Survey delivered service from photolab, drawing office and EDB section. Secretary assistance was performed by Hanne Nylander.

PROJECT SUMMARY

The Salt Research Project EFP-81 has mainly been aiming upon an elucidation of the stratigraphy of the Danish Zechstein evaporites. Also an attempt to clarify the connection between the fabric and the strength of the strongly deformed domal rock salt is performed.

The unravelling of the stratigraphy is carried out by means of renewed interpretations of new and old data from all the wells drilled in the Danish Permian basin in connection with a revaluation of the core descriptions. By means of trace elements analysis it is possible to some extent to distinguish between Zechstein 1 and 2 "grey salt".

A description of the transition zone between Zechstein 1 and 2 is carried out.

New methods of fabric analyses are introduced and the strength measurements of the rock salt are treated statistically in connection with new defined rock salt parameters.

An investigation of fluid inclusions in halite and quartz crystals from dome salt has resulted in the determination of salinity and chemical composition of the brines present in the salt. Temperatures and corresponding pressures during the evolution of the salt pillow and salt dome have been established.

The dehydration conditions of natural carnallite in situ are clarified.

SALT RESEARCH PROJECT EFP - 81

Volume I. Sammen drag af Saltforskningsprojekt EFP-81. (English summary).
Editor: J.Fabricius.

Forord.

Historisk oversigt.

Kapitel 1. Stratigrafi.

Kapitel 2. Stensaltets texturelle opbygning.

Kapitel 3. Mikrotermometri.

Volume II. Stratigraphy.

Chapter 1. Lithostratigraphy of the Zechstein Salts in the Norwegian-Danish Basin.
Fritz Lyngsie Jacobsen.

Chapter 2. Description of the Dolomite-Anhydrite Transition Zone (Zechstein 1 -
Zechstein 2) in the Batum-13 well, Northern Jutland, Denmark.
Martin Sønderholm.

Chapter 3. A geochemical study on Zechstein Salt and Anhydrite from the Batum-
1A well.
Niels Springer.

Volume III. Fabric Analyses of Domal Rock Salt.

Chapter 1. Textural and Petrofabric Analyses of Rock Salt related to Mechanical
Test Data - a quantitative Approach.
Jørgen Gutzon Larsen.

Chapter 2. Statistical Analyses of Mechanical Properties of Rock Salt.
Per Lagoni.

Volume IV. Microthermometry.

Chapter 1. Studies of Fluid Inclusions in Halite and euhedral Quartz Crystals
from Salt Domes in the Norwegian-Danish Basin.
Johannes Fabricius.

Chapter 2. Formation Temperature and Chemistry of Brine Inclusions in euhedral
Quartz Crystals from Permian Salt in the Danish Trough.
Johannes Fabricius.

Chapter 3. The Thermal Stability of Natural Carnallite in Cognate Geological
Environments.
Johannes Fabricius.

Historisk oversigt over de undersøgelser og boringer, der er foretaget i det norsk-danske bassin af Zechstein evaporiteterne.

Zechstein saltenes stratigrafi er belyst gennem fornyet logtolkning og revaluering af kernebeskrivelser. En sporstofanalyse viser en vis forskel mellem de grå salte fra Zechstein 1 og 2. Overgangszonen mellem Z1 og Z2 er indgående beskrevet.

Nye metoder til analyse af stensaltets texturrelle opbygning introduceres. Opbygningen sammenholdes med trykstyrken for at korrelere denne med saltkornenes form og krystallografiske opbygning samt saltets lagdeling og foliation. Trykstyrken og nye saltparametre er korreleret statistisk til brug ved konstruktion af gaskaverner.

Væskeindeslutninger i halit og kvartskrystaller er undersøgt mikrotermometrisk. Saltopløsningernes kemi er bestemt. Flere kvartskrystallers dannelsesstemperaturer og -tryk belyser domernes udviklingshistorie. Naturlig carnallits dehydreringsbetingelser in situ er bestemt i et stort temperatur- og trykområde.

Geological Survey of Denmark
Thoravej 31
DK 2400 Copenhagen
Denmark
Phone + 45 1 10 66 00

ISBN 87 88640 08 6 (Bd.1-4)