

DANMARKS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE

Serie B, Nr. 5

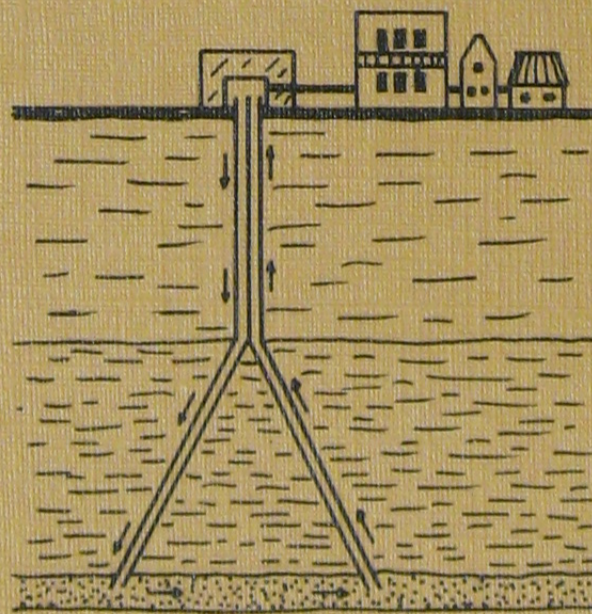
Geological Survey of Denmark. Series B, No. 5

Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark

af

*Olaf Michelsen, Svend Saxov, Jørgen A. Leth
Claus Andersen, Niels Balling, Niels Breiner, Lise Holm,
Knud Jensen, Jan I. Kristiansen, Troels Laier, Erik Nygaard,
Jens Chr. Olsen, Kurt D. Poulsen, Søren Priisholm, Thomas B. Raade,
Torben Rex Sørensen og Jørgen Würtz*

Red. af Olaf Michelsen



I kommission hos C. A. Reitzels forlag. København 1981

Kortlægning af potentielle geotermiske reservoirer i Danmark

af

*Olaf Michelsen, Svend Saxov, Jørgen A. Leth,
Claus Andersen, Niels Balling, Niels Breiner, Lise Holm,
Knud Jensen, Jan I. Kristiansen, Troels Laier, Erik Nygaard,
Jens Chr. Olsen, Kurt D. Poulsen, Søren Priisholm, Thomas B. Raade,
Torben Rex Sørensen og Jørgen Würtz*

Red. af Olaf Michelsen

D.G.U. Serie B, nr. 5
er sat med Foto Times
og trykt i offset i 1000 eksemplarer
hos AiO Tryk as, Odense
ISBN 87-421-0728-8
Date of publication 1981-12-31



A contribution to
PROJECT TORNQUIST
(IGCP Accession Number 86)

Indhold

Abstract	4	Beskrivelse af reservoirformationer	23
Sammenfatning	4	Palæozoikum	23
Indledning	5	Kambrisk kvartsitisk sandsten	23
Generel del	6	Karbon kalksten	23
Strukturelle hovedelementer	6	Rotliegendes sandsten	25
Fennoskandiske Randzone	6	Zechstein kalksten	25
Ringkøbing-Fyn Højderyggen	6	Trias	27
Danske Subbassin	6	Bunter Sandsten Formation	27
Nordtyske Bassin	6	Ørslev Formation	32
Beskrivelse af lagserien	9	Falster Formation	32
Palæozoikum	9	Tønder Formation	35
Trias	10	Gassum Formation	35
Jura	11	Jura-nedre kridt	45
Kridt	12	Haldager Sand	45
Udvælgelse af de analyserede formationer	12	Frederikshavn Member	52
Principper for temperaturberegning	13	Hydrokemi	59
Varmeledningsevne	13	Regional reservoirkarakteristik	59
Varmeproduktion	14	Vurdering af reserverne	65
Den geotermiske flux	14	Tak	67
Overfladetemperatur	15	Acknowledgements	67
Temperatur og temperaturgradienter	15	English summary	68
Vurdering af porøsitet, permeabilitet og net sand tykkelse	19	Litteratur	76
Porøsitets- og permeabilitetsværdier	20	Appendix 1: Tabel over dybder, tykkelser, po- røsiteter og permeabiliteter	79
Net sand	21	Appendix 2: Tabel og figurer over varmeled- ningsevne og varmeproduktion	85
Midt dybde	21	Appendix 3: Beregningsresultater fra vurderin- gen af reserverne	92
Dybdekortlægning	22		

Abstract

The present report comprises primary data and analyses of potential geothermal reservoirs in Denmark. All available well data and seismic data from the Danish onshore area are included.

Based on core material and petrophysical measurements, the following formations are described: Cambrian quartzitic sandstone, Carboniferous limestone, Rotliegendes sandstone, Zechstein carbonates, Bunter Sandstone Formation (Triassic), Ørslev Formation (Triassic), Falster Formation (Triassic), Tønder Formation (Triassic), Gassum Formation (Triassic – L. Jurassic), Haldager Sand (M. Jurassic), and Frederikshavn Member (U. Jurassic – L. Cretaceous).

Generalized depth maps have been constructed for Near top Bunter Sandstones Formation, Near top Triassic, Base Haldager Sand, and Base Upper Cretaceous Limestone, from seismic two-way time maps of the relevant horizons.

Isotherm maps of the corresponding horizons, based on measured values (BHT) and new, calculated model values, are presented.

The reservoir parameters – porosity, permeability, net sand, and depth – have been analysed and evaluated from core material and petrophysical measurements. These data are presented in isopach maps of each formation, and in tables.

The regional distribution of potential reservoirs in the depth interval 2000–3000 m is described, and the geothermal reserves are evaluated, with regard to energy.

Sammenfatning

Nærværende rapport er baseret på analyser og fortolkninger af eksisterende dybdeboringsdata og seismiske data fra det danske landområde.

Rapportens første afsnit, »Generel del«, omfatter en oversigtsmæssig beskrivelse af de geologiske, strukturelle, stratigrafiske og aflejningsmæssige forhold i den for undersøgelsen relevante del af lagserien. I det følgende afsnit redegøres der for baggrunden for udvælgelse af de her analyserede formationer. Alle kendte formationer under øvre kridts kalk-

sten er inddraget i projektarbejdet, således at bearbejdningen er udtømmende for så vidt angår registrering af data og primær beskrivelse af formationernes reservoirkarakterer.

Metoder til vurdering af temperatur, de primære reservoirkarakterer som porøsitet, permeabilitet og net sand tykkelse, samt kortlægning af formationernes dybde behandles i tre særlige kapitler.

Vurderingen af temperaturer er baseret på teoretiske modeller og målte værdier i det omfang sådanne forefindes. Som grundlag for modelberegningerne er bjergartstermiske egenskaber målt på et stort antal borekerner. Samme kernemateriale er benyttet til måling af porøsitet og luftpermeabilitet. Væskepermeabilitet er kun målt i enkelte tilfælde. Porøsitet er desuden beregnet ud fra petrofysiske målinger (logs), der ligeledes er benyttet til vurdering af net sand tykkelser. Det har ikke været muligt inden for de afstukne rammer at undersøge mineralsammensætning, hærdning, dybde og lignende faktoreres indflydelse på permeabilitet. Grundet manglende data er hydrokemiske aspekter kun kortfattet omtalt.

Der er foretaget seismisk kortlægning af enkelte fremtrædende refleksionshorisonter. På grundlag heraf er der fremstillet fire generaliserede dybdekort.

I afsnittet »Beskrivelse af reservoirformationer« gives der en oversigt over analyseresultaterne for de enkelte formationer: Dybde, tykkelse, net sand tykkelse, porøsitet, permeabilitet og temperatur. Beskrivelsen ledsages af kort indeholdende den regionale variation af disse parametre. Detaljerede tabeller findes i appendix 1 og 2.

Reservoirformationerne kan kort karakteriseres således. De palæozoiske formationer, *kambrisk kvart-sitisk sandsten*, *karbon kalksten* og *rotliegendes sandsten*, er kun kendt fra et begrænset antal boringer. De skønnes ikke at være egnede geotermiske reservoier.

Zechstein kalksten forekommende i Syddjylland kan lokalt muligvis udnyttes geotermisk.

De triassiske formationer, *Bunter Sandsten Formation*, *Tønder Formation* og *Gassum Formation*, vurderes alle som havende positive geotermiske reservoirkarakterer. *Ørslev Formationen* og *Falster Formationen* skønnes at have ringe reservoirkarakterer.

Det jurassiske *Haldager Sand* forventes i begrænsede områder at have rimelig gode reservoirkarakterer, medens det jurassisk-nedre kretaciske *Fredrikshavn Member* skønnes at have en begrænset værdi i geotermisk sammenhæng grundet den ringe dybde til lagene.

Afsnittet "Regional reservoirkarakteristik" er en konkluderende sammenfatning af ovennævnte beskrivelser inden for en ramme angivet af dybdeintervallet 2000–3000 m. Opdelt på forskellige regioner beskrives hvilke formationer, der forekommer inden for dette dybdeinterval, og deres relative værdi i geotermisk sammenhæng angives.

Endelig gives der i afsnittet "Vurdering af reserverne" et resumé af, hvordan det geotermiske potentiel er vurderet. Her omtales de væsentligste forudsætninger for og resultater af den udførte analyse, hvis formål er at vurdere, hvor stor en del af de estimerede ressourcer, der ud fra et energimæssigt synspunkt kan udnyttes.

Litteraturlisten sidst i rapporten er sammenstillet således, at den omfatter den litteratur der skønnes relevant vedrørende geologi, geofysik og geotermisk energi i det danske område.

Indledning

I november 1976 nedsatte handelsministeriet en arbejdsgruppe, der skulle undersøge mulighederne for udnyttelse af geotermisk energi i Danmark. Ekspertgruppen bestod af repræsentanter fra Danmarks Geologiske Undersøgelse, Handelsministeriet, Energistyrelsen, Århus Universitet og Miljøstyrelsen. I februar 1977 fremkom gruppen med en rapport, der indeholdt både geologiske og hydrologiske vurderinger af udnyttelsesmulighederne samt et økonomisk overslag over udgifterne ved etablering og drift af et geotermisk anlæg.

Dansk Olie & Naturgas A/S (D.O.N.G. A/S) fik i efteråret 1977 til opgave at lede det praktiske arbejde i forbindelse med efterforskningen, hvorefter D.O.N.G. A/S i 1978 fik eneretsbevilling. Som led i de nødvendige forundersøgelser nedsatte D.O.N.G. A/S en arbejdsgruppe med en rådgivende funktion. I forbindelse med bevillingen til efterforskning blev der afsat 1,5 mill. kr. til mere forskningsprægede, landsdækkende undersøgelser af mulighederne for kommende geotermisk efterforskning og indvinding. Danmarks Geologiske Undersøgelse (DGU), Forsøgsanlæg Risø og Laboratoriet for Geofysik ved Aarhus Universitet (AU) fik til opgave at formulere et projekt af denne karakter, hvilket skete i foråret

1978. Projektet skulle gennemføres i perioden 1. juli 1978 til 31. december 1979 af de tre nævnte institutioner og med projektledelsen hos DGU. Projektarbejdet blev i sommeren 1980 rapporteret i "Landsdækkende geotermiske Undersøgelser. Del 1 og 2 København 1980". Nærværende publikation er et forkortet optryk af denne rapport.

Vedrørende formål og sigte skal følgende kortfattede uddrag af projektbeskrivelsen gengives:

"Undersøgelsens formål er at foretage en landsdækkende vurdering af mulighederne for udnyttelse af geotermisk energi, herunder at søge lokaliseret de områder, der skulle frembyde de bedste muligheder for udnyttelsen. Undersøgelsen skal indeholde en analyse af eksisterende geologiske, geofysiske og geotermiske data, samt indsamling og bearbejdning af nye data".

"Geologiske og geotermiske parametre vil blive beskrevet bl.a. i form af kort over reservoirernes dybde, tykkelse og udbredelse. Kort over porøsiteter, permeabiliteter, petrografi, termiske egenskaber og temperaturer vil blive fremstillet for de enkelte reservoirer".

Undersøgelsen har først og fremmest omfattet en registrering af data, analyse og beskrivelse af primære reservoirparametre og en oversigtlig sammenstilling af disse. Grundet manglende tid og ressourcer er videnskabelig analyse af parametrenes variation i forhold til forskellige faktorer, så som aflejringernes faciesvariation og diagenese, kun foretaget i begrænset omfang.

Ved DGU er ca. 700 m borekerner, repræsenterende alle nedennævnte reservoirformationer, blevet nybeskrevet med særlig henblik på kornstørrelsesfordeling og facies. Et tilsvarende stort antal plugs er udboret for måling af porøsitet og luftpermeabilitet. Med de forhåndenværende midler har det desværre kun været muligt i begrænset omfang at foretage analyse af væskepermeabilitet. Sammenholdt med disse data er for samtlige eksisterende borer fortolket petrofysiske målinger til vurdering af net sand tykkelser i de enkelte formationer og af gennemsnitlige værdier for porøsitet og permeabilitet (luft). Disse reservoirparametre er i nærværende rapport fremstillet i tabel- og kortform. Primært ud fra borehulsdata er der foretaget en kortlægning af reservoirformationernes dybde og tykkelse. Arbejdet er udført af Lise Holm, Jens Ole Koch, Olaf Michelsen, Erik Nygaard, Gunver K. Pedersen og Søren Priisholm.

DGU har yderligere foretaget dybdekortlægningen baseret på seismiske målinger. Med enkelte mindre undtagelser er alt eksisterende seismisk materiale

blevet fortolket og 4–5 horisonter kortlagt i "tid", der er den enhed hvori den seismiske måling foretages. Via analyse og beregning af hastighedsfunktioner er de fire horisonter vurderet og kortlagt m.h.t. dybde i meter. For så vidt angår Sjælland er arbejdet udført af Claus Andersen, medens kortlægning af Jylland er foretaget af Jens Christian Olsen og Torben Rex Sørensen under vejledning af J. C. Baartman.

Laboratoriet for Geofysik, Aarhus Universitet, har foretaget bestemmelser af temperaturer for de aktuelle formationer og dybdeniveauer. Temperaturvurderingen er baseret på teoretiske modeller og målte værdier, hvor sådanne findes. Som grundlag for modelberegningerne er der målt bjergartstermiske egenskaber på DGU's kernematerialer. Der er udviklet og bygget nyt apparatur til varmeledningsevnebestemmelser og til nøjagtige målinger af temperaturer i dybe borer og beregninger af temperaturgradienter. Arbejdet er udført af laboratoriets geotermiske arbejdsgruppe bestående af N. Balling, N. Breiner, J. I. Kristiansen, K. Damtoft Poulsen og Svend Saxov.

På grundlag af den geologiske og geofysiske undersøgelse er der foretaget en vurdering af det geotermiske potentiel. Her er vurderet, hvor stor del af de estimerede ressourcer, der ud fra visse rimelige kriterier er udnyttelige ud fra et energimæssigt synspunkt. Der er ikke draget økonomiske hensyn med ind i vurderingen; dog er tekniske løsninger, der på forhånd må anses for økonomisk prohibitive, udeladt.

Vurderingen, der er udført på Forsøgsanlæg Risø af Knud Jensen, Jørgen A. Leth, Thomas B. Raade og Jørgen Würtz, bygger på en opdeling af de geologiske formationer i en række afgrænsede områder. Til brug for vurderingen er reservoirregenskaberne antaget konstante i de enkelte områder. Inden for hvert område er vurderet, hvor meget energi der netto kan udvindes, og en summering over samtlige områder er foretaget.

Projektledelse og redaktion er varetaget af Olaf Michelsen.

Generel del

Som baggrund for udvælgelsen og analyseringen af formationer med henblik på en eventuel geotermisk efterforskning beskrives nedenfor den geologiske opbygning i Danmarks undergrund. Analyse af den strukturelle, sedimentologiske og facielle udvikling

er en nødvendig forudsætning for det kommende arbejde på dette felt.

Til støtte for forståelsen af nærværende kapitel og "beskrivelse af reservoirformationer" er de strukturelle hovedelementer vist i fig. 1 og den stratigrafiske inddeling i fig. 2.

Strukturelle hovedelementer

Danmarks undergrund i undersøgelsesområdet kan inddeles i følgende strukturelle hovedelementer (fig. 1):

Den fennoskandiske Randzone danner den nordvestlige del af det regionalt overordnede Tornquist-Teisseyre lineament, som kan spores mod sydøst helt til Sortehavet. Dette lineament adskiller den stabile østeuropæiske prækambriske og palæozoiske platform fra de yngre nordvesteuropæiske sedimentære bassinområder. Den fennoskandiske Randzone er en kompliceret opbygget blokforkastningszone med en udviklingshistorie, der er dokumenteret at gå tilbage til tidsrummet øvre karbon-nedre perm, og at spille en væsentlig rolle under de mesozoiske (kimmeriske) og tertiære (laramiske) tektoniske faser. I det danske område strækker denne zone sig fra Vendsyssel i nord mod sydøst gennem Kattegat, Skåne til den sydlige Østersø. Bornholm udgør en isoleret horst placeret i randzonen.

Ringkøbing-Fyn Højderyggen, Stevns- og Møn Blokkene tilhører et regionalt VNV-ØSØ-gående strøg af højdeområder og "øer" gennemskåret af rift strukturer og mindre trug. Dette strøg kan følges til den britiske del af Nordsøen og er karakteriseret af højtliggende grundfjeld. Således er prækambrisk grundfjeld blevet anført i mindre end 900 m dybde ved Glamsbjerg på Fyn beliggende centralt på Højderyggen.

I det danske område adskiller Ringkøbing-Fyn Højderyggen *Det danske Subbassin* (del af det større Norsk-danske Bassin) mod nord fra *Det nordtyske Bassin* mod syd.

Dette strukturelle mønster er anlagt i løbet af nedre perm og kan illustreres ved de generaliserede dybde-konturer til præ øvre perm overfladen samt ved den formodede udbredelse af aflejringer fra zechstein (øvre perm) (fig. 1). Indsynkningen i bassinernes centrale dele har været betydelig i de efterfølgende perioder. Således viser seismiske målinger, at der siden nedre perm er aflejret mere end 8000–9000 m sedimenter centralt i Det danske Subbassin (vestligste Himmerland og Hanherred).

I lighed med perm perioden er det sandsynligst, at dele af Ringkøbing-Fyn Højderyggens grundfjelds-

STRUCTURAL ELEMENTS OF DENMARK PRE UPPER PERMIAN

MODIFIED AFTER BAARTMAN 1976

10 0 50 Km

CLAUS ANDERSEN
GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK
1980

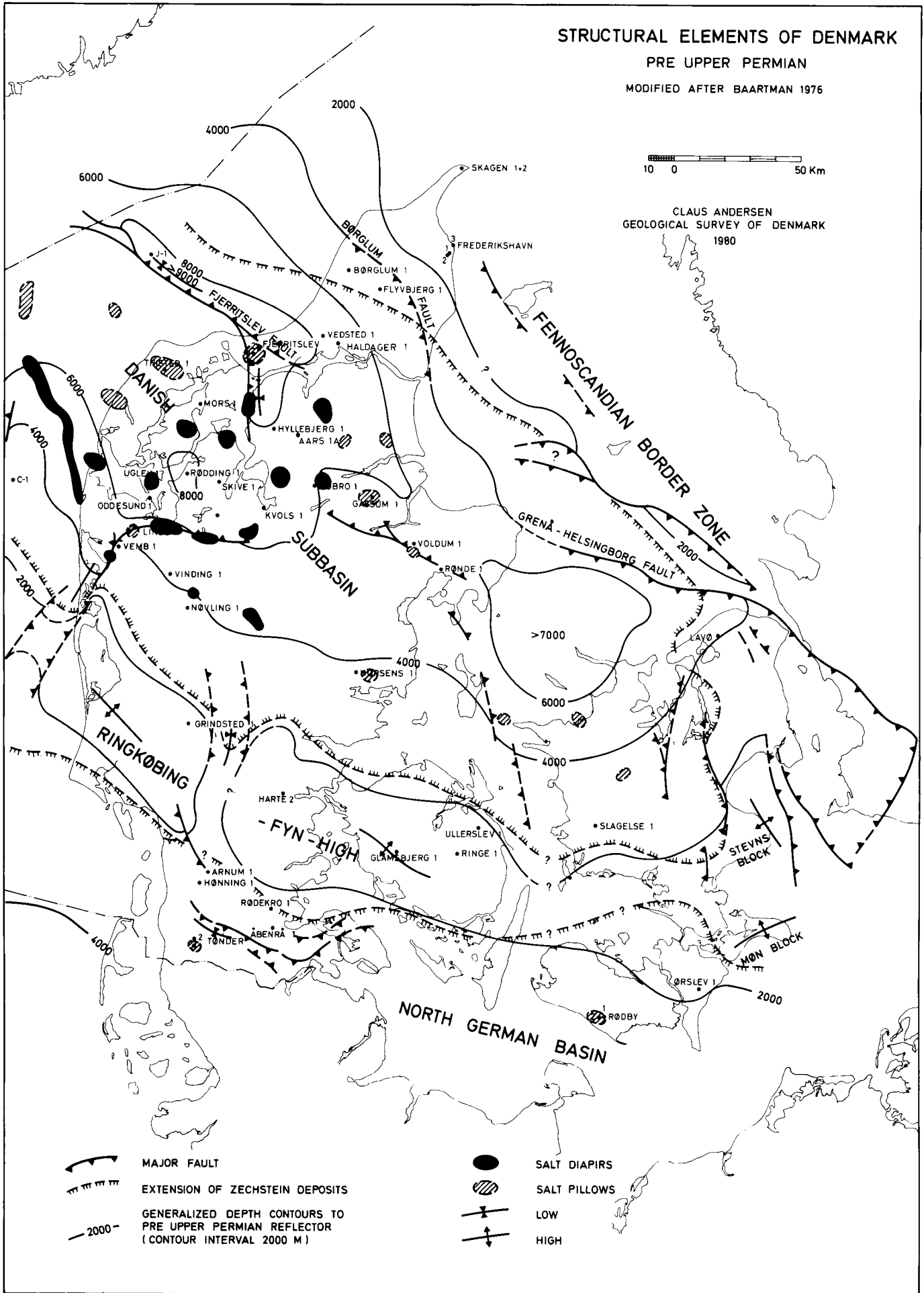


Fig. 1. Hovedstrukturelementerne samt dybde i meter til lagene under øvre perm.

Fig. 2.

SYSTEM	SERIE	ETAGE	FORMATION	MEMBER
KRIDT	Nedre	Albien	Ø.kridt kalksten	
		Aptien Barremien Hauterivien Valanginien	Rødby Formation	
		Berriasien	Vedsted Formation	
JURA	Øvre	Portlandien	Bream Formation	Frederikshavn Member
		Kimmeridgien		Børglum Member
		Oxfordien		
	Mellem	Callovien Bathonien Bajocien	Haldager Formation	Flyvbjerg Member
				Haldager Sand
	Nedre	Aalenien	Fjerritslev Formation	Member F-IV
		Toarcien		Member F-III
		Ø. pliensbachien		Member F-II
		N. pliensbachien		Member F-I ^b
		Ø. sinemurien		Member F-I ^a
	N.sin.-hettangien			
	TRIAS	Øvre	Rhaetien	Gassum Formation
Norien			Vinding Form.	
Carnien			Skagerrak Formation	Member O ₃
		O ₂ Evaporit		
		O ₂ Evaporit		
		Member O ₁		
Mellem		Ladinien	Tønder Form.	
		Anisien	Falster Form.	
Nedre		Olenikien	Ørslev Form.	
		Jakutien	Bunter Sandsten Formation	
	Brahmanien	Bunter Lersten Formation		

SYSTEM	SERIE	ETAGE	BJERGARTSTYPER
PERM	Zechstein		Stensalt, kalksten
	Rotliegendes		Sand-, silt-, lersten, vulkanske bjergarter
KARBON			Kalksten, mergelsten
			Kalksten, mergelsten
DEVON			Silt-, lersten, vulkanske bjergarter
			Silt-, lersten, vulkanske bjergarter
SILUR			Lerskifer
			Siltsten
ORDOVICIUM			Kvartsit
KAMBRIUM			

STRATIGRAFISK STANDARDINDELING AF DEN DANSKE UNDERGRUND

DGU 1980

kerne har ligget blottet som "øer" i den ældste del af trias, og at de to bassiner har da kun været forbundne via mindre trug. I løbet af mellem trias synker Højderyggen og der opstår et sammenhængende aflejningsområde. Indsynkningen af Højderyggen har dog været beskeden sammenlignet med indsynkningen af de egentlige bassiner, idet sedimenterne tynder stærkt ud over denne. Denne udvikling fortsætter til udgangen af nedre jura, hvor der sker en større regional hævnning af det danske område. I den efterfølgende såkaldte midt kimmeriske tektoniske fase (mellem jura) hæves Højderyggen og der finder en intensiv erosion sted over dens centrale dele. I bassinerne fortsætter indsynkningen. Ved udgangen af øvre jura finder endnu en regional hævnning sted og efter denne fortsætter indsynkningen inklusive Ringkøbing-Fyn Højderyggen, der således også dækkes af aflejringer fra den yngste del af nedre kridt, øvre kridt og teriær. Ved overgangen øvre kridt-tertiær (den laramiske tektoniske fase) hæves hele zonen langs Den fenno-skandiske Randzone nordøst for de markante Fjerritslev og Grenå-Helsingborg forkastningszoner. Herefter sker et skift i det strukturelle mønster i den ældste del af terciær, idet den resterende del af det danske område nu bliver en del af det større skålformede Nordsø Bassin og Ringkøbing-Fyn Højderyggen mister endelig sin betydning.

Hovedparten af de sedimenter, der i trias-jura perioderne er aflejret i den danske del af Det nordtyske Bassin og Det danske Subbassin består af klastisk materiale (ler, silt og sand) der i det sidstnævnte Subbassin hovedsagelig er tilført fra nord og øst af skiftende floder og vandløb. Dette indebærer, at de mest grovkornede aflejringer generelt skal søges i et bælte langs Det danske Subbassins nord- og østrand.

Synsedimentære forkastningsaktiviteter i Fjerritslev og Børglum Forkastningerne forekommer bl.a. i trias. Således har den successive nedforkastning af blokkene nord for Fjerritslev Forkastningen medført sedimentation af relativt store mængder af grovklastisk materiale.

Saltstrukturer er et karakteristisk element både i Det danske Subbassin og i Det nordtyske Bassin. Specielt i den nordjyske salthorst provins kendes mere end 10 salt diapirer, hvor stensalt forekommer på ringe dybde. Her er ved inddampning af havvand i zechstein perioden aflejret 500–1200 m stensalt, som i de efterfølgende perioder er blevet overlejret af sediment med en tykkelse på adskillige kilometer.

Som følge af stensalts relativt lavere massefylde og høje plasticitet kan denne bjergart starte horisontale og vertikale bevægelser ved overlejring af tykke sedimentserier. Første stadium i saltbevægelsen vil være dannelse af bløde opbulninger (saltpuder) og

ved fortsat bevægelse vil der dannes stejlt stillede salt diapirer, som bryder igennem de overliggende lag. Ved saltmigration i undergrunden i retning af saltstrukturene udvikles omkring strukturerne lokale indsynkninger, hvor sedimenttykkelsen bliver anormalt stor (randsynklinaler). Tilsvarende vil der ske en udtynding af sedimenterne på toppen af en saltstruktur i løbet af dens udviklingshistorie.

I Nordjylland formodes saltbevægelserne at være startet i keuper (øverste trias) og fortsat op i nutiden.

Beskrivelse af lagserien

I enkelte borer på Ringkøbing-Fyn Højderyggen og nord for Det danske Subbassin er der fundet gnejs af *prækambrisk* alder. Umiddelbart over gnejs er der fundet arkoser og konglomerater. De er af ukendt alder og må forventes at dække grundfjeldet i store områder. Ligeledes af ukendt alder findes i Sønderjylland siltsten og lersten umiddelbart under zechsteinaflejringerne.

Palæozoikum

Aflejringer ældre end zechstein saltserien er kun truffet i enkelte borer, hvorfor en vurdering af deres regionale udbredelse er meget usikker. Nedenfor vil derfor kun deres dokumenterede forekomst blive omtalt.

I boringen Slagelse 1 findes nederst lag fra *kambrium* perioden. Det drejer sig om de nedre kambriske kvartsitiske sandsten og lerede siltsten. Øvre kambrium er repræsenteret ved mørke lerskifer (alunskifer).

Siltsten og lersten af *silur* alder er fundet i tre borer nord for Ringkøbing-Fyn Højderyggen. I to af borerne, Rønde 1 og Nøvling 1, findes tillige vulkanske bjergarter af nedre silur alder.

Kalksten, mergelsten og røde til grå lersten af *nedre karbon* alder er kun truffet i boringen Ørslev 1.

Med større regional udbredelse er der under zechstein stensaltlagene truffet rødlig og rødbrune lersten, siltsten og sandsten af formodet *rotliegendes* alder. Disse non-marine aflejringer må formodes at dække større områder på begge sider af højderyggen. Enkelte steder er forekomst af vulkanske bjergarter konstateret.

Ved overgangen til øvre perm, *zechstein*, var Det nordtyske Bassin og Det danske Subbassin dannet og inddampningsbjergarter som stensalt, anhydrit og kalksten aflejredes cyklisk. Marginalt, bl.a. langs Højderyggens flanker, dannes revkalk.

Trias

Den nedre triassiske *buntsandstein* serie repræsenterer en regressiv periode gennem hvilke overvejende kontinentale aflejringsforhold var fremherskende i det nordvesteuropæiske sedimentationsområde.

I buntsandstein var Danmark opdelt i en leret provins, dækkende Det nordtyske Bassin, Ringkøbing-Fyn Højderyggen og den sydøstlige del af Det danske Subbassin, og en sandet provins, dækkende den centrale og nordvestlige del af Det danske Subbassin. Mellem de to provinser er der en gradvis overgang, som er iagttaget i borerne Rønde 1, Gassum 1 og Mors 1.

I den lerede provins består nedre buntsandstein (*Bunter Lersten Formation*) overvejende af rødlig brun og brun, siltholdig lersten med grønlig partier samt spredte forekomster af anhydrit. Mellem buntsandstein (*Bunter Sandsten Formation*) minder om nedre buntsandstein, men karakteriseres af forekomsten af 2–3 velafgrænsede lagserier af siltsten og finkornet sandsten, der mod nord går over i én sandet enhed. Øvre buntsandstein (*Ørslev Formation*) repræsenteres af grønlig grå og brunlig lersten vekslende med anhydrit og kalksten, samt sydligst med stensalt.

I modsætning til den lerede provins er lithologien i den sandede provins forholdsvis ensartet bestående af rødlig, leret, arkoselignende sandsten. Denne facies udgør den nedre del af *Skagerrak Formationen*, som er betegnelsen for de monotone, sandede, triassiske randaflejringer langs nord- og østranden af Det danske Subbassin.

Buntsandstein serien består mod nord hovedsagelig af kontinentale, fluviatile aflejringer afsat under aride til semi-aride forhold. Mod syd veksler kontinentale lag med brakvandsaflejringer. Sandfordelingen indikerer, at materialet ensidigt er transporteret fra nord og nordøst ind i bassinerne. De bedste reservoirbjergarter findes derfor antageligt i et bælte langs den nordlige og østlige rand af Det danske Subbassin.

Ørslev Formationens nedre del i den lerede provins repræsenterer lavvandede brakt-marine transgressioner kommende fra sydøst. På grund af det tørre, varme klima har vandbalancen i perioder været overvejende negativ, dvs. at fordampningen har været større end vandtilførslen, hvorved de opløste salte er udfældet og danner markante lag. Den øvre del af serien er kontinentalt præget. Den har ingen reservoirmæssig betydning.

Den mellem triassiske *Falster Formation* består af vekslende lersten, mergelsten og kalksten med spredte forekomster af anhydrit. Sedimentfarven er overvejende grågrøn og grå, sjældnere brun og rødlig.

Den nedre del af formationen er generelt rigere på kalksten, der ofte er fossilførende. Mod nord afløses formationen gradvist af Skagerrak Formationens sandsten. Formationens nedre lag er marine, medens den øvre del må tolkes som en lavvandet, periodevis tør-lagt brakvandsdannelse. Formationen har næppe reservoirmæssig betydning, men de jævndrende sandsten i Skagerrak Formationen vil antagelig kunne udnyttes.

Tønder Formationen minder stærkt om buntsandsteinserien. Formationen består af rødlig brun, brun og grønlig, siltholdig lersten med spredte anhydritindslutninger, samt øverst i formationen af enkelte velafgrænsede lag af siltholdig, finkornet rødbrun og grågrøn sandsten, der ofte indeholder fint, forkullet plantemateriale. Mod nord tiltager sandindholdet og formationen går gradvist over i Skagerrak Formationen. Tønder Formationen består overvejende af kontinentale dannelser afsat under et tørt og varmt klima. Sandstensdannelserne øverst i formationen tyder på perioder med forøget nedbør. Sandstenslagene er potentielle reservoirer, medens den nedre del af formationen ikke kan tillægges nogen betydning i denne sammenhæng.

Odesund Formationen består af lersten og siltsten, rødbrun, brun og grå, med enkelte anhydritindslutninger og tynde lag af mergelsten og dolomitisk kalksten. I den centrale del af Det danske Subbassin forekommer to veludviklede serier af stensalt. Mod bassinranden afløses de to serier af anhydritrig lersten. Formationen er helt eller delvis borteroderet over dele af Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Langs nordranden af Det danske Subbassin fortsætter sandsedimentationen (*Skagerrak Formationen*). Aflejringerne består af vekslende kontinentale dannelser og brakvandsdannelser præget af et varmt og tørt klima. De to evaporitserier viser at fordampningen i to perioder har oversteget vandtilførslen til bassinet.

Under aflejringen af disse sedimenter begynder pudedannelsen i perm saltet, og formationen er derfor af uens tykkelse.

Vinding Formationen består af vekslende lersten og kalksten. Lerstenen er kalkholdig med et varierende saltindhold. Mørkegrå til sort olivengrå farver dominerer. Anhydrit forekommer sporadisk i den nedre del. Kalkstenslagene findes på bestemte niveauer i serien og kan genkendes fra boring til boring. Nederst i formationen findes grå og brune, dolomitiske kalksten, medens den midterste del karakteriseres af grå og brune, oolitiske kalksten, og den øverste af tynde bånd af dolomitisk kalksten.

Serien er aflejret i brakvand med generelt ringe vanddybde. Medens kystnære forhold med periodisk

udtørring synes at have hersket i den tidlige fase, må den øvre del af formationen betragtes som prodelta lersten afsat på noget dybere vand og tilhørende det nedenfor nævnte Gassum Delta, som opbyggedes i forbindelse med en klimaændring fra tørre til mere nedbørsrige klimaforhold ved slutningen af triastiden.

Formationen er impermeabel og derfor uden reservoirmæssig betydning.

Gassum Formationen består overvejende af fint til mellemkornede, lysegrå sandsten, der veksler med mørkere lersten og siltsten. Kullag forekommer spredt. Formationen underinddeles i tre enheder (members), men lokalt kan yderligere enheder forekomme. Den nederste enhed (G_1 Member) har gode reservoiregenskaber og er typisk udviklet som en serie, der nederst består af lersten, siltsten og opefter af sandsten med tiltagende grovkornethed. Den overliggende enhed (G_2 Member) domineres af organisk rige, mørke lersten med underordnet forekomster af siltsten og lersten. Den øverste enhed (G_3 Member) består af grå og rødlig lersten overlejret af lyse grønliggrå sandsten og siltsten, der ofte indeholder glaukonit.

Gassum Formationen er tolket som en fluviatildeltaisk aflejring. G_1 Member må opfattes som aflejringer fra det såkaldte Gassum Delta. Det drejer sig om delta-front dannelser med tiltagende kornstørrelse op gennem serien i de centrale og sydlige dele af bassinet. Mod top af enheden er sandet aflejret i fletværkskanaler efterfulgt af organisk rige lag afsat i afsnørede bugter og kanaler. G_2 Member ses som brakt-marine aflejringer, der stammer fra en stigning af havniveauet, hvorved deltafladen druknede. Det store indhold af organisk materiale er bevaret grundet et lavt iltindhold ved havbunden. G_3 Member repræsenterer en regressiv fase (faldende havniveau) hvor limnisk betingelser kom til at herske i store dele af bassinet. Den øvre glaukonitførende silt- og sandsten i dette member er dog dannet ved den begyndende nedre jurassiske transgression, der førte til dannelsen af Fjerritslev Formationen (se nedenfor). Gassum Formationen er vurderet til at have gode reservoirkarakterer.

Jura

På overgangen mellem trias og jura starter en fornyet indsykning af Det danske Subbassin og aflejring af de nedenfor beskrevne marine lersten tager sin begyndelse i den centrale del af bassinet. Aflejring af de fluviatil-deltaiske sedimenter kaldet Gassum Formationen fortsætter mod nordøst i begyndelsen af jura. I

Vendsyssel er store dele af Gassum Formationen således af nedre jurassisk alder.

Den nedre jurassiske *Fjerritslev Formation* består af ensartede, mørke lersten med varierende indhold af silt.

Lagserien er en marin shelf aflejring afsat under indsykning af bassinet. Den nederste del er en lavtvandsserie med tynde kalk- og siltlag aflejret samtidig med dannelsen af Gassum Formationen i Vendsyssel. Hovedparten af Fjerritslev Formationen er afsat på dybere vand, medens øverste del atter er en lavtvandssedimentation, der antagelig har fundet sted under lagunale betingelser. Formationen har ikke reservoirmæssig karakter.

På overgangen nedre-mellem jura hæves områderne langs Ringkøbing-Fyn Højderyggen og dele af eller hele Fjerritslev Formationen borteroderes. Den relative sænkning af havniveauet i mellem jura medfører at tilførselskanalerne mod nordøst bygger et delta ud i bassinet, Haldager Deltaet. I denne periode aflejres deltaaflejringer og kystnære havaflejringer i form af *Haldager Formationen*.

Den nederste del af Haldager Formationen, kaldet *Haldager Sand*, består af lysegrå, fint til mellemkornet sandsten og siltsten, der oftest er homogen og velsorteret. Krydslejring forekommer. Tykke lag af sandsten veksler med tynde lerlag og enkelte kullag. I den nordøstlige del af området, hvor lagserien har sin maximale tykkelse, kan den opdeles i flere underenheder svarende til rytmisk skiftende aflejringsbetingelser. Lagserien vurderes som havende reservoirkarakterer. Den overlejres af *Flyvbjerg Member*, der er en vekslende lagserie med forholdsvis tynde lag af sandsten, siltsten og lersten. Den repræsenterer hurtigt skiftende aflejringsbetingelser, der har hersket på delta-fladen ved havets gradvise overskylning af denne.

Den øverste del af Flyvbjerg Member er af øvre jurassisk alder, og repræsenterer dermed begyndelsen af bassinets anden indsykningsperiode i jura. Under denne indsykning afsættes *Børglum Member*, der er en marin lerstens serie aflejret på den dybere del af shelfen. Den er uden reservoirmæssig betydning. Den største indsykning finder sted i den centrale del af bassinet og mod vest i Nordsøen. Mod nordøst, i Vendsyssel, har der kun været tale om en kortvarig periode, hvorefter kystnære litoral-deltaiske forhold atter hersker. Dette er en følge af at der på overgangen mellem jura og kridt atter sker en hævnning af området og mængden af groft materiale, der føres ud i bassinet, stiger, hvorved *Frederikshavn Member* dannes. Serien består af siltsten og finkornet sandsten, der veksler med siltholdig lersten. Tynde lag af kalksten forekommer i den øverste og nederste

del af serien. Længst mod nordøst i Vendsyssel findes der få cm-tukke kullag i den øvre del af serien. Lagserien antages at have moderat gode reservoirkarakterer.

Lagserien er overvejende en marin aflejring. Mod øst og nordøst er den meget tyk og repræsenterer et stort tidsinterval, medens den mod vest er tyndere (antagelig repræsenterende et mindre tidsinterval) og er mere finkornet. Lagserien afspejler således en generel sænkning af havniveauet i store dele af øvre jura og nedre del af nedre kridt. Mod nordøst er den nedre og øvre del af serien karakteriseret ved at indeholde fossiler og glaukonit, medens den midterste del indeholder en stigende mængde plantemateriale, der er vasket ud i bassinet fra landområderne mod øst.

Kridt

I løbet af nedre kridt sker der atter en indsynkning af Det danske Subbassin, og i den sidste del af perioden oversvømmer havet hele det danske område således, at de yngste nedre kridt aflejringer dækker henover Ringkøbing-Fyn Højderyggen og her hviler på lag af trias alder.

I Det danske Subbassin er *Vedsted Formationen* aflejret over Frederikshavn Member og består af mørkegrå ler- og siltsten. Det er en marin aflejring, der i de kystnære områder mod nordøst veksler med mere grovkornede sedimenter.

Mod slutningen af nedre kridt ændrer sedimentationen karakter på to måder. For det første oversvømmes som nævnt hele landet. For det andet bliver sedimenterne stærkt kalkholdige. Det drejer sig primært om *Rødby Formationen*, som overvejende består af rødbrun mergel. Den dækker hele landet bortset fra Vendsyssel, hvor den erstattes af grønlig, glaukonitholdige sedimenter. Vedsted og Rødby Formationerne har ingen reservoirmæssig betydning, medens de randnære sandstensaflejringer antagelig er gode men højtliggende reservoirer.

I sidste del af nedre kridt perioden er indledt en ny hovedfase, idet Ringkøbing-Fyn Højderyggen atter dækkes af havet. Klimaet bliver atter tørt og varmt, og havet tilføres derfor kun ringe mængder ler og sand. I stedet bundfældes slamkalk bestående af skeletdele fra planktoniske mikroorganismer, – øvre kridts hvide kalksten. Den nederste del af denne kalkstensserie, der i begrænsede områder ligger relativt dybt, har kun middelmådige reservoirkarakterer.

Udvælgelse af de analyserede formationer

Som omtalt i indledningen og som det fremgår af litteraturfortegnelsen er der siden 1977 skrevet enkelte rapporter om muligheden for indvinding af geotermisk energi i Danmark. Der er i denne forbindelse peget på forskellige lag i undergrunden, som kunne være genstand for kommende undersøgelser, efterforskning og exploration. Ved tilrettelæggelsen af nærværende projekt blev det besluttet at gøre alle disse formationer til genstand for analyse og vurdering og på den måde at give en samlet oversigt over disse formationers reservoirparametre.

De pågældende formationer findes i lagserien fra basis af den øvre kretaciske kalksten til top af grundfjeldet. Der er således indbefattet lag, som i visse dele af landet ligger for dybt til på nuværende tidspunkt at være genstand for efterforskning af geotermisk energi. Øvre kridt kalkstenen er ikke indbefattet i undersøgelsen, primært fordi den i størstedelen af landet ikke ligger dybt nok til at have en passende temperatur. Dertil kommer som nævnt ovenfor, at den nedre del af kalkstensserien skønnes at have middelmådige reservoirkarakterer.

Erkendelsen af mulige reservoirformationer baseres primært på petrofysiske målinger fra eksisterende borer. Disse er foretaget over en lang årække. Kvaliteten af målingerne er derfor meget varierende, og for en dels vedkommende giver de kun begrænset mulighed for en forholdsvis sikker vurdering. Detaljerede analyser af ældre og nyere målinger, suppleret med analyse af eventuelle borekerner, har i nærværende projekt givet en mere nuanceret og detaljeret beskrivelse af formationer (se nedenfor).

De palæozoiske formationer kendes kun fra få borer og deres regionale udbredelse og variation er lidt kendt. Det drejer sig om kalkstens- og sandstensaflejringer.

De triassiske formationer kendes fra en række borer og forekommer med enkelte undtagelser over hele landet. Det drejer sig om fem formationer, som i større eller mindre udstrækning er præget af sandstensforekomster. Sandstenslagenes tykkelse og sand/ler forholdet, som bl.a. har været genstand for nærværende undersøgelser, varierer både vertikalt og horisontalt.

De to formationer fra jura-nedre kridt er af samme type som de triassiske. De er kendt fra en række borer og er stort set begrænset til Nordjylland.

Med udvælgelsen af disse formationer var det hensigten at gøre undersøgelsen udtømmende med hensyn til mulige reservoirer, således som vi idag kender undergrundens opbygning. For de enkelte formationer fra trias, jura og nedre kridt er der dog en varierende mængde datapunkter kendt ligesom disse punkter er ulige fordelt geografisk. Den palæozoiske lagserie er kun kendt i et begrænset omfang.

Principper for temperaturberegning

Undergrundens temperaturfordeling tilfredsstiller varmeledning ligningen, der på almen form kan skrives som

$$\text{div}(k \text{ grad } T) - \text{div}(\rho'c'\bar{v}T) + A = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Ligningen angiver sammenhængen mellem temperatur (T), tiden (t), hastigheden (\bar{v}) for materialer i bevægelse og de materialefysiske parametre, massefylde (ρ, ρ'), varmeyfylde (c, c'), varmeledningsevne (k) og varmereproduktion (A). Kendes de parametre, der indgår i ligningen, og de nødvendige begyndelses- og randbetingelser, såsom overfladetemperaturen og den geotermiske flux (heat flow), kan temperaturen bestemmes teoretisk som en analytisk eller numerisk løsning til denne ligning. Er parametrene valgt korrekt, skal der være overensstemmelse mellem teoretisk beregnede og målte værdier.

De målte temperaturer, der foreligger fra de danske dybdeboringer er i det væsentlige Bottom Hole Temperature (BHT) opgivet af de selskaber, der har foretaget kulbrinteeftersøkningsboringer. Det er generelt vanskeligt at vurdere nøjagtigheden af disse målinger, men hvor der er foretaget flere bestemmelser i samme dybdeniveau og til forskellig tid efter cirkulation af boremudder i boringen, kan nøjagtigheden vurderes, og en approksimativ ligevægtstemperatur (sand formationstemperatur) kan ofte bestemmes gennem teoretisk eller empirisk korrektion.

Inden for dybdeintervallet 2000–3000m indicerer måleresultaterne såvel regionale som lokale variationer af størrelsesordenen ± 10 til $\pm 30^\circ\text{C}$. Generelt må sådanne variationer tilskrives variationer i undergrundens varmeledningsevne og geotermisk flux, evt. desuden varmereproduktion og grundvandsbevægelse. For at kunne vurdere disse forhold opstilles her regionale fysiske modeller for undergrunden.

Erfaringsmæssigt kan der regionalt ses bort fra materialebevægelse, tidsmæssige temperaturvaria-

tioner og horisontal varmestrøm. Under disse simplificerende forudsætninger har varmeledning ligningen formen

$$\frac{d^2T}{dz^2} = - \frac{A}{k} \quad (2)$$

hvor z er dybden i jordmodellen. Vi skal her inddеле undergrunden i en række horizontale lag med konstant varmeledningsevne og varmereproduktion. Temperaturen ved basis af det n^{te} lag kan da bestemmes via følgende analytiske løsningsudtryk:

$$T_n = T_o + \sum_{i=1}^n \left[\frac{(z_i - z_{i-1})}{k_i} \left(q_o - \sum_{j=1}^{i-1} A_j(z_j - z_{j-1}) - \frac{A_i(z_i - z_{i-1})^2}{2k_i} \right) \right] \quad (3)$$

hvor T_o og q_o er temperatur og geotermisk flux ved overfladen ($z=0$), z_i dybden til basis af det i^{te} lag, k_i og A_i varmeledningsevne og varmereproduktion i det i^{te} lag. De vigtige parametre er således foruden overfladetemperaturen den geometriske flux samt varmeledningsevne og varmereproduktion for lagfølgen til det maksimumsniveau, hvor temperaturen ønskes beregnet. De enkelte parametre skal i det følgende vurderes.

Varmeledningsevne

Der er på DGU's kernematerialer gennemført en serie bestemmelser af varmeledningsevne (jvf. appendix 2). Middelværdien af 175 enkeltbestemmelser (værdien målt på cuttings-prøver er ikke medtaget) er $2,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ og standardafvigelsen $1,0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (fig. 3). Ledningsevnernes nøjagtighed er varierende på grund af materialernes stærkt varierende karakter. For porøse materialer er der en betydelig forskel på ledningsevnen for tørt og vandmættet materiale. Det er derfor for tørre prøvematerialer nødvendigt at genskabe den vandmættede situation, eller hvor dette ikke er muligt, beregningsmæssigt via målt porøsitet og måling i f. eks. alkoholmættet materiale at bestemme den ækvivalente værdi for vandmættet bjergart. Ved denne proces sker der typisk fysiske ændringer, der forringer målingernes kvalitet. Det gælder især for bjergarter, der indeholder betydelige mængder lerminerale. De nøjagtigste værdier fås generelt for sandsten og kalksten. Samtlige værdier er bestemt med "needle probe" metoden i vandmættet eller al-

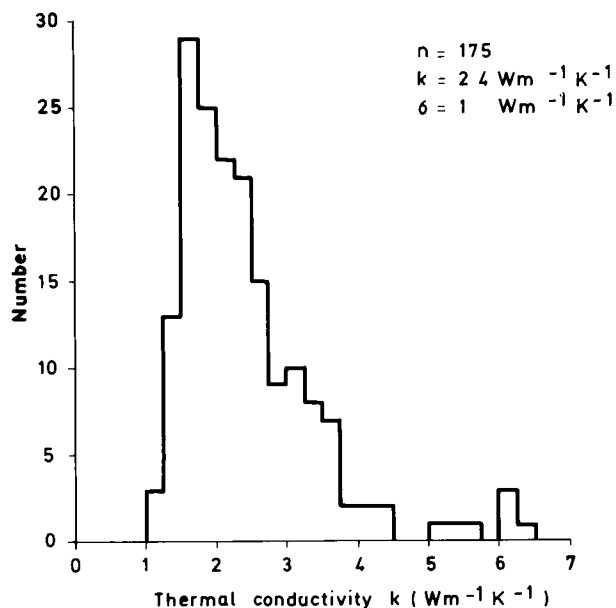


Fig. 3. Histogram over varmeledningsevne.

koholmættet materiale. Enkeltbestemmelserne skønnes at have en nøjagtighed på $\pm 10\%$.

De laveste værdier på $1-2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ forekommer ved stærkt lerholdige bjergarter. Stensalt, anhydrit og dolomit har de højeste værdier på $5-7$. Sandsten har typisk værdier på $2,5-4$ og kalksten $1,5-2,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Variation med dybde og lithologi fremgår af appendix 2, fig. 17–21. For bjergarter med samme mineralsammensætning er ledningsevnen stærkt porositetsafhængig, således at ledningsevnen aftager med stigende porøsitet. Der er gennemført enkelte målinger af temperatureffekten på ledningsevnen. Disse resultater samt værdier hentet fra litteraturen viser, at denne effekt for de aktuelle bjergarter typisk er forholdsvis lille sammenlignet med den nøjagtighed, hvormed ledningsevnen er kendt i de større dybder, hvor effekten måtte være signifikant.

Baseret på de omtalte målinger samt foreløbige værdier fra den detaljerede termiske undersøgelse af ledningsevne og temperaturgradienter i Aars 1a er der for lagfølgen fra havniveau til basis af trias (jvf. tabel 1) opstillet de i tabel 2 viste ledningsevne-modeller.

Der er tale om middel vertikal ledningsevne for de enkelte lag. De foretrukne værdier anvendes i model A, og model B og C indeholder værdier, der skønnes at være nær henholdsvis maximum og minimum.

Tabel 1. Definition af laggrænser anvendt vedr. varmeledningsevneinddeling (jvf. tabel 2)

Lag	Tidsafsnit (d: dybde under havniveau)
1	Havniveau til top danien
2	Danien og øvre kridt; $d < 500 \text{ m}$
3	Danien og øvre kridt; $500 \text{ m} < d < 1000 \text{ m}$
4	Øvre kridt; $d > 1000 \text{ m}$
5	Nedre kridt, øvre jura og mellem jura
6	Nedre jura
7	Trias

Tabel 2. Varmeledningsevne – fordeling (værdier i $\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

Lag	Model A	Model B	Model C
1	2,0	2,5	1,5
2	1,7	1,8	1,6
3	2,1	2,3	2,0
4	2,7	2,9	2,5
5	2,0	2,4	1,8
6	1,5	1,8	1,3
7	3,0	3,5	2,5

Varmeproduktion

Varmeproduktion i de geologiske materialer er bestemt af koncentrationen af U, Th og K, hvis radioaktive isotoper gennem henfald giver anledning til produktion af varme. U, Th og K koncentrationen for 28 sedimentprøver er bestemt af Risø med gammaspektrometrimetoden. Baseret på disse målinger er varmereproduktionen beregnet (jvf. appendix 2). Der er anvendt målte eller skønnede massefyldeværdier samt standardværdier for isotopsammensætning og varmeafgivelse. Standardafvigelse svarer til ca. $\pm 0,05 \mu\text{W m}^{-3}$ på enkeltmålingerne. Middelværdien af bestemmelserne er $1,1 \mu\text{W m}^{-3}$ med standardafvigelsen $0,7$ (jvf. fig. 4).

I de teoretiske beregninger anvendes værdien $1 \mu\text{W m}^{-3}$ konstant for alle lag. For dybdeintervallet $0-3000 \text{ m}$ er modeeffekten $0-2^\circ\text{C}$ og for intervallet $3000-7000 \text{ m}$ $1-10^\circ\text{C}$. På grundlag heraf vurderes sedimenternes varmereproduktion at være så lav, at dens indflydelse på temperaturfordelingen for den aktuelle problemstilling generelt er negligerbar.

Den geotermiske flux

Der er hidtil i det danske område kun gennemført foreløbige direkte bestemmelser af den geotermiske flux. Disse bestemmelser er foretaget i overfladenære formationer. For større dybder foreligger 6 skønnede

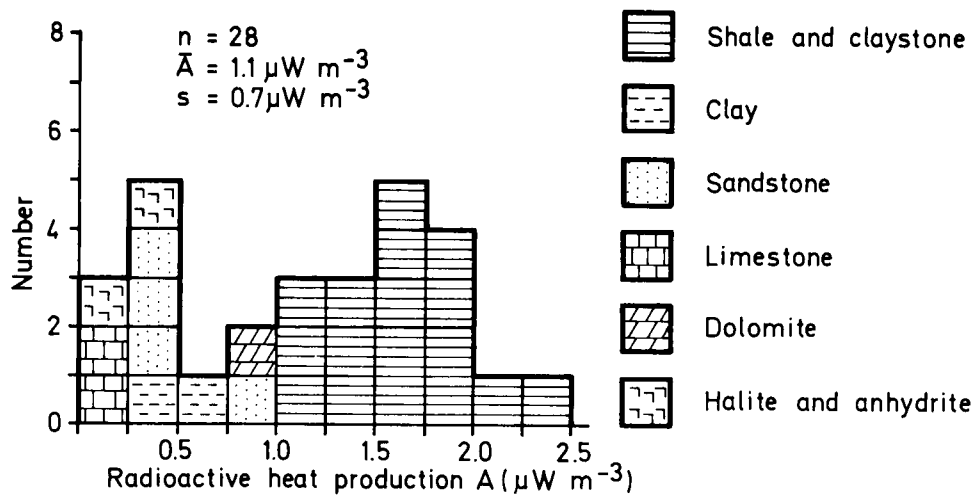


Fig. 4. Histogram over varmeproduktion.

værdier, hvoraf de 5 er fra lokaliteter i det nordlige Jylland (fig. 5). På grundlag heraf samt baseret på variationer kendt fra naboområder eller områder med tilsvarende geologisk opbygning som den danske, skønnes fluxen generelt at ligge inden for intervallet 50–80 mW m⁻².

For Storbritanien, der er godt undersøgt (Richardson og Oxburgh 1979), er middelværdien ca. 60 mW m⁻². Variationer mellem 40 og 70 mW m⁻² forekommer for store områder. Den lavest observerede værdi er 25 og den højeste 130 mW m⁻². Høj varmeflux er fundet over områder med granitiske intrusivlegemer, der er beriget med U, Th og K. Mange sådanne strukturer er kendt fra blotninger i det sydsandinaviske grundfjeld og må forventes at forekomme under sedimenterne i det danske område. Kendskabet til placeringen af sådanne strukturer foreligger ikke, og de hidtidige varmefluxbestemmelser muliggør ikke opstilling af modeller med geografiske variationer. Derfor regnes med konstante modelværdier for hele landet. I model A anvendes 60 og i model B og C henholdsvis 50 og 80 mW m⁻².

Overfladetemperatur

Middeltemperaturen i jordoverfladen afviger yderst sjældent fra 7–9°C. Fra terrænoverfladen til havniveau, der er udgangsniveau for modelberegningerne, vil temperaturen med den danske topografi typisk stige 1–3°C. Modeltemperaturen for havniveau er regnet konstant 10°C.

Temperatur og temperaturgradienter

Temperaturberegningerne foretages på grundlag af de ovenfor omtalte tre modeller. Model A indeholder de foretrukne parametre, i model B kombineres høj varmeledningsevne og lav varmeflux, og i model C lav varmeledningsevne og høj varmeflux. Da varmeproduktionen er meget lille, vil de enkelte lag i modellen have næsten konstante geotermiske gradienter bestemt via $\Delta T/\Delta z = q_0/k$. Værdier for disse gradienter fremgår af tabel 3.

De teoretiske modeltemperaturer sammenholdes med målte BHT-værdier i fig. 6 for fire områder: 1) Centrale dele af Det danske Subbassin, 2) Området syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen, 3) Sjælland og, 4) Ringkøbing-Fyn Højderyggen samt det nordligste Jylland med højtliggende grundfjeld. For de fire områder er der valgt typiske lagfølger til temperaturdybde beregningen.

Tabel 3. Geotermiske gradienter (værdier i mK m⁻¹=°C km⁻¹)

Lag	Model A	Model B	Model C
1	30	20	53
2	35	28	50
3	29	23	40
4	22	17	32
5	30	21	44
6	40	28	62
7	20	14	32

På grundlag heraf vurderes model A at give det bedste grundlag for en regional vurdering af reservoirtemperaturerne. Model B og C er konstrueret, så de skulle give hvad der antages at være nær de henholdsvis laveste og højeste temperaturer, der kan op-

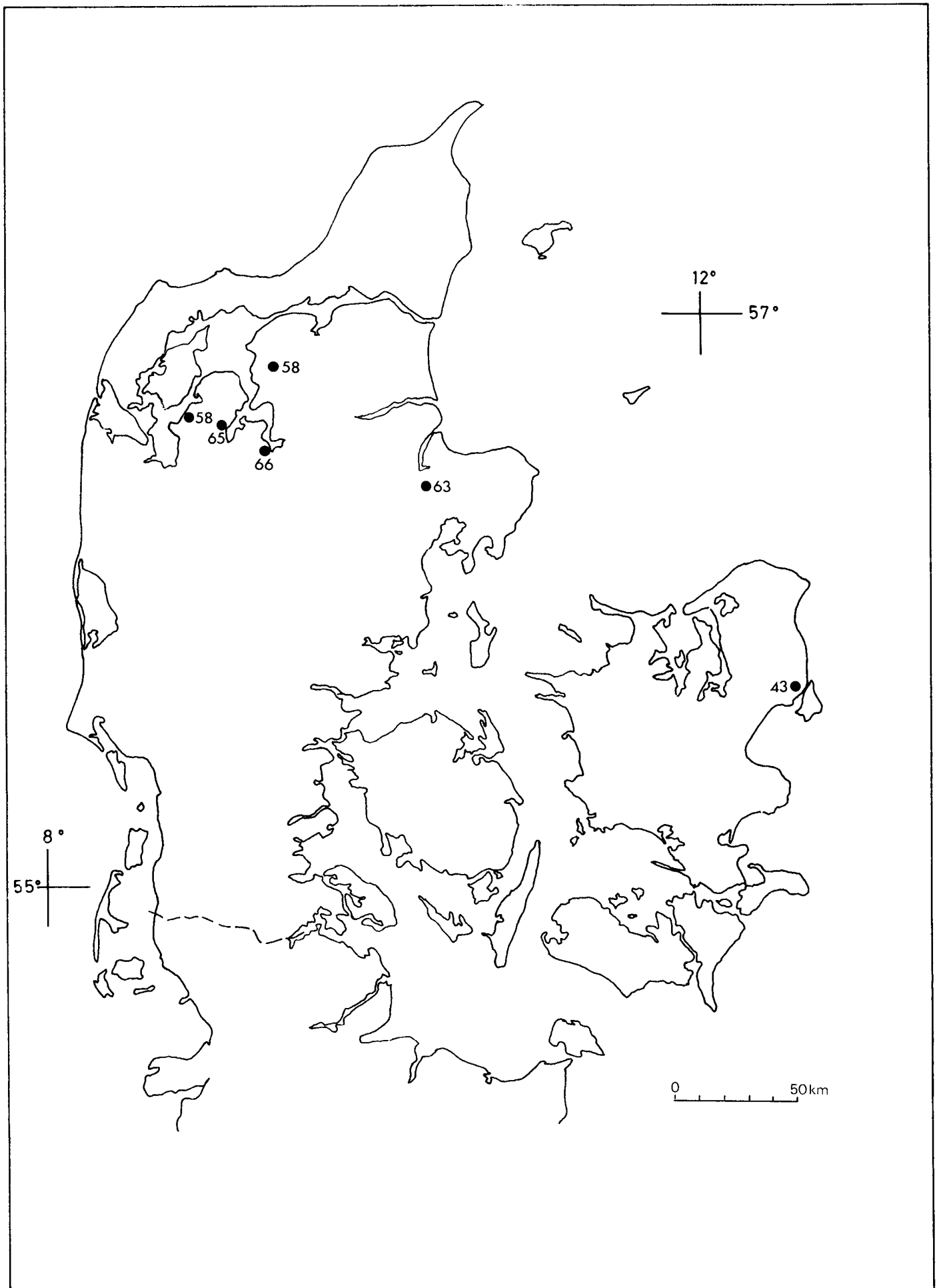


Fig. 5. Skøn over den geotermiske flux (mW m^{-2}). Værdierne angives uden klimatisk korrektion: (Balling 1979).

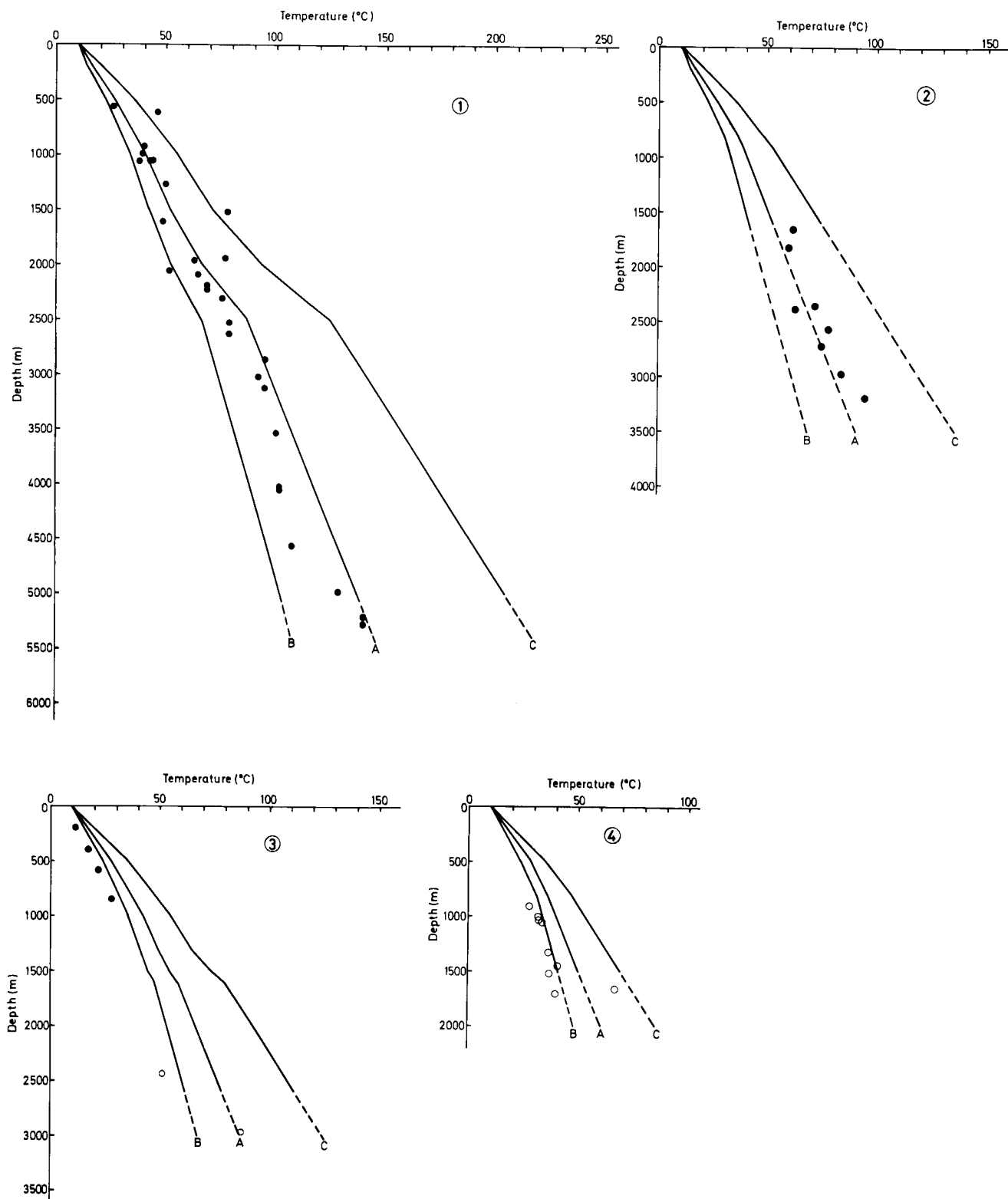


Fig. 6. Typiske modeltemperaturer i relation til BHT-værdier for centrale dele af Det danske Subbassin (1), områder syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen (2), Sjælland (3) og områder over Ringkøbing-Fyn Højderyggen og det nordligste Jylland (4). Korrigerede BHT- eller ligevægtsværdier er angivet ved punkter og ukorrigerede værdier ved cirkler. (Ukorrigerede værdier er medtaget for områder uden eller med få korrigerede værdier).

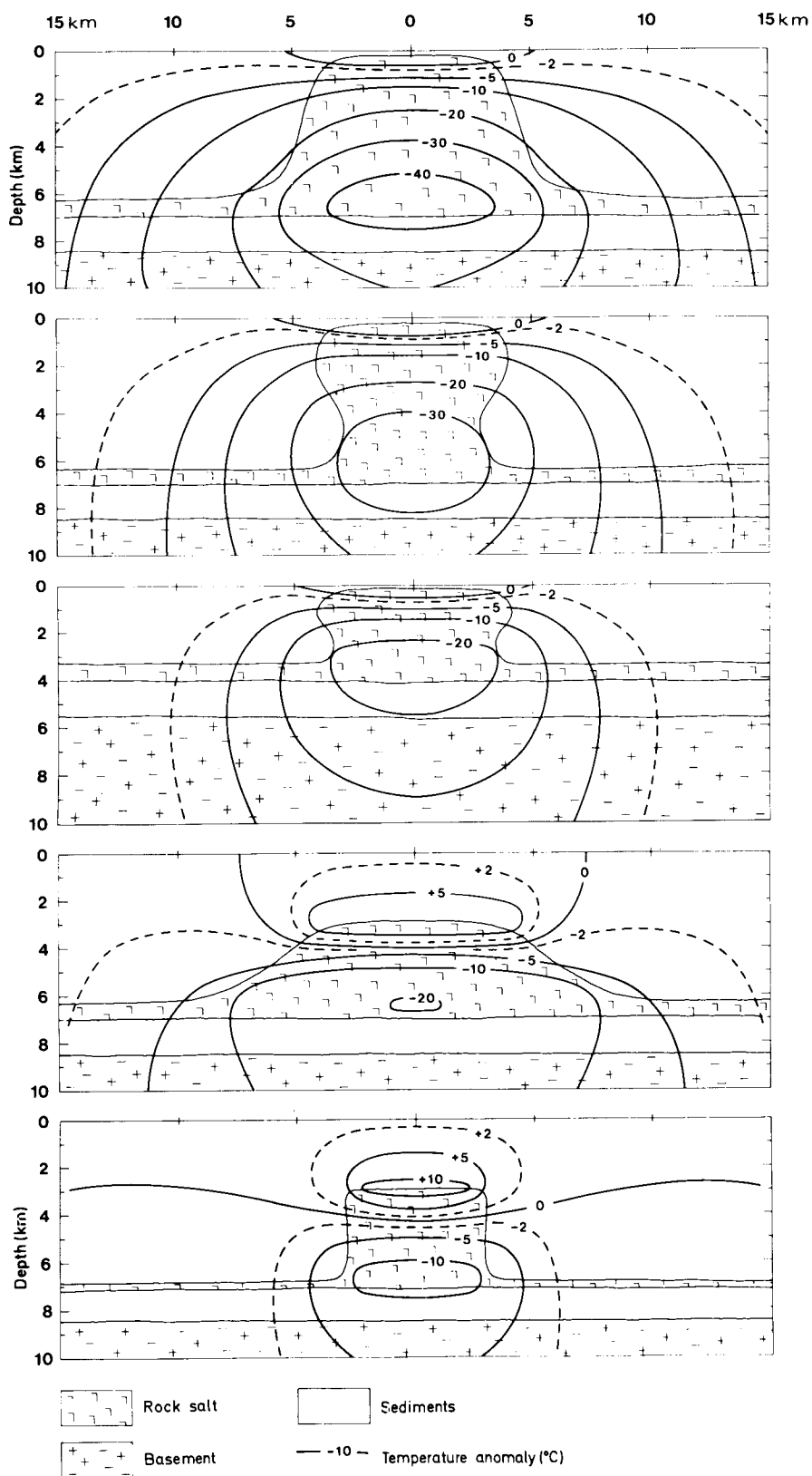


Fig. 7. Temperaturmodelanomalier beregnet for saltstrukturer af varierende form (cf. Balling 1978).

nås, hvilket er i god overensstemmelse med måleresultaterne. Sandsynligheden for at opnå temperaturer nær model B-værdierne synes generelt højere end sandsynligheden for at opnå værdier nær model C-værdierne. Man må dog antage, at selv de korrigerede BHT-værdier ofte vil angive minimumsværdier.

Der er ikke i modellerne taget hensyn til temperatureffekten fra klimatiske variationer, der sandsynligvis vil reducere modeltemperaturerne med typisk 3–5°C inden for dybdeintervallet 500–1500 m.

Ved temperaturberegningerne er landet inddelt i et net med sidelængde 10' (øst-vest) × 6' (nord-syd) for området syd for 56°N og øst for 10°Ø. I den øvrige del af landet dvs. det nordvestligste Jylland er sidelængden halveret (5' × 3'), idet der her over korte afstande forekommer større dybdevariationer. For hvert netpunkt er dybden til basis af de aktuelle lag bestemt fra de geologiske kort, og temperaturen er beregnet via ligning (3). Der er fremstillet model A, B og C isothermkort for basis af øvre kridt kalksten (fig. 38–40), basis af Haldager Sand (fig. 31–33) og for nær top trias (fig. 24–26). Desuden er der fremstillet model A isothermkort for approximativ basis trias (fig. 15) samt for dybderne 2000 og 3000 m (fig. 42 og 44).

Modelnøjagtigheden for isotermerne afhænger af den dybdemæssige nøjagtighed, hvormed de geologiske laggrænser er bestemt. En nøjagtighed på ±200–300 m svarer typisk i model A til ±5–10°C, i model B til ca. ±5°C og i model C til ±10–15°C.

De stiplede kurver på isothermkortene angiver områder med saltstrukturer, hvor modelforudsættningerne vides ikke at være opfyldt. Kurveforløbet angiver det approximative niveau, som isotermerne ville følge, dersom saltlegemet ikke var til stede. Størrelsen af de temperaturanomaler, som strukturerne forårsager, afhænger af deres form, størrelse og dybdemæssige placering (jvf. fig. 7). Vurderingen af temperaturen under beskrivelsen af de enkelte reservoirformationer er primært foretaget på grundlag af model A. Model B og C indeholder værdier, der kan forekomme for både begrænsede områder og større områder, hvor måleinformation er meget ringe f.eks. Sjælland, men som på det foreliggende grundlag ikke anvendes til en regional vurdering.

Vurdering af porøsitet, permeabilitet og net sand tykkelse

Porositets- og permeabilitetsværdier (se appendix 1 og fig. 8) er baseret på kontinuerte petrofysiske borehulsmålinger og kerneanalyser.

Porositetsværdier baseret på petrofysiske målinger er beregnet ud fra følgende logs:

Formation Density Log	FDC
Neutron Log, Compensated	CNL
Sonic Log, Interval Transit Time	ITT
Spontaneous-Potential Log	SP
Resistivity Log	

Hver log er så vidt muligt vurderet, kalibreret og korrigeret for borehullets diameter, boremuddrets sammensætning, temperaturvariation og lithologi.

Petrofysiske målemetoder har undergået en rivende udvikling inden for de sidste ti til femten år, ligesom kvaliteten af de petrofysiske målinger er forbedret væsentligt. Dette medfører, at målinger fra før 1965–70 er af mindre god kvalitet. Datamængden fra gamle borer er stærkt begrænset og muligheden for at foretage korrektioner er ringe.

For hver boring er reservoirlagene identificeret på logs. Log'en er inddelt i afsnit af mægtighed 0,5–5 meter med ensartede petrofysiske værdier.

Log-udslagene er aflæst, korrigeret og brugt til porositetsberegning. Porositeten af et reservoirlag, således som det fremgår af nærværende rapport, er vægtede gennemsnit af porositetsværdier for lagets enkelte delafsnit. Det totale, vægtede gennemsnit af reservoirlag indenfor en formation samt reservoirlagenes samlede tykkelse fremgår af appendix 1 og kortene, fig. 12, 13, 18, 19, 21, 22, 28, 29, 35 og 36.

Størst sikkerhed i porositetsberegningen fremkommer såfremt det er muligt at plote densitetsmåling (FDC) mod porositetsmåling (CNL). Såfremt dette ikke er muligt kan densitets- og porositetsmålingen bruges alene til en udmærket porositetsberegning.

Sonic log'en (ITT) registrerer, hvor hurtigt et lyd-signal forplantes igennem en given bjergart. Lydhastigheden kan under visse forhold ligeledes anvendes til porositetsberegning, men beregningen er behæftet med nogen usikkerhed.

Boringer fra før 1955 har ingen af ovennævnte logs. Da en stor del af borerne er fra før 1955, er det fundet påkrævet at vurdere porositetsforholdene

i disse borerer ved brug af Spontaneous-Potential Log (SP) og Resistivity Log målinger. Det er på den måde muligt at beregne porøsiteten ved hjælp af empiriske formler. Denne indirekte beregningsmetode er afhængig af adskillige variable faktorer, der ofte er dårligt kendt på grund af mangelfuld rapportering fra disse gamle borerer. Hvor det er muligt er porøsitetsberegninger foretaget ved denne metode, men de anførte værdier skal tages med stort forbehold. Ved kontrol i borerer, hvor porøsitetsberegning fra andre logs eller kerneanalyser foreligger, viser det sig at Spontaneous-Potential og Resistivity porøsitetsberegningerne er for høje.

Kerner fra reservoirformationer er beskrevet lithologisk og analyseret efter nedennævnte standardiserede normer.

Den lithologiske kernebeskrivelse omfatter en generel beskrivelse af kernens bjergarter, bestemmelse af grovkornede aflejrings sortering og afrunding, angivelse af farve og mineralindhold samt vurdering af bjergartens aflejringsmiljø.

Efter kernebeskrivelsen er kernen korreleret med de lithologiske fortolkninger fra de petrofysiske målinger for at fastslå dens nøjagtige placering i reservoir.

Detaljerede kerneanalyser omfattende måling af porøsitet og luftpermeabilitet samt analyse af bjergarternes tekstur og struktur er udført på udborede cylinderprøver, plugs, fra udvalgte niveauer af kernen.

Med henblik på bestemmelse af porøsitet og permeabilitet er horisontale og vertikale plugs udboret af kernen for hver 30–40 cm i de udvalgte niveauer. Disse cylinderprøver er 2–3 cm lange og med diameter 1,9 cm eller 2,5 cm.

Plug'en er beskrevet under mikroskop med henblik på bestemmelse af parametre, der influerer på porøsitet og permeabilitet. De vigtigste parametre er kornstørrelse, sorterings- og hærtningsgrad.

Porøsiteten er uafhængig af kornstørrelsen, men stærkt afhængig af variationen i kornstørrelse, dvs. sorteringsgraden. Stor variation og dermed dårlig sortering formindsker porøsiteten, fordi små korn udfylder hulrummene mellem de større.

Den effektive porøsitet (porøsiteten af forbundne porer) samt porernes absolutte størrelse spiller en rolle for permeabiliteten. Som hovedregel gælder, at jo mindre kornstørrelse og jo dårligere sortering, des mindre porestørrelse og dermed ringere permeabilitet. Selv et lille lerindhold i et sediment vil nedsætte permeabiliteten og dermed reservoirs produktivitet.

Hærtnings forårsaget af cementering og udkrystallisation af mineraler i porerne nedsætter både porø-

sitet og permeabilitet. Porøsiteten aftager tillige med reservoirs dybde i bassinet, idet belastningen af overliggende bjergarter forårsager en sammenpresning af aflejringer. Dette forhold er eksemplificeret under beskrivelsen af de enkelte reservoirformationer (se f.eks. fig. 11).

Udvalgte prøver er blevet beskrevet petrografisk og mineralogisk ved hjælp af petrografmikroskopi (tyndslib) og røntgendiffraktometri for at undersøge og vurdere graderne af kompaktion og hærtnings.

Porøsitets- og luftpermeabilitetsbestemmelser er foretaget på plug-prøverne i DGU's laboratorium.

Porøsitet er bestemt på to måder, enten ved at indeslutte prøven i et trykkammer under skiftende trykforhold eller ved, under højt tryk, at fylde bjergartens porer med kviksølv og måle det indsprøjtede volumen. Begge metoder giver et mål for effektiv porøsitet.

Førstnævnte metode, Boyle's Lov metoden, giver en porøsitetsbestemmelse med usikkerhed på mindre end $\pm 1\%$, medens porøsitetsbestemmelse ved kviksølvinjektion generelt giver pessimistiske værdier, der tillige er behæftet med en større usikkerhed end $\pm 1\%$. Boyle's Lov metoden er derfor anvendt til rutineanalyser.

I nærværende arbejde er permeabiliteten bestemt som luftpermeabilitet ud fra det relative tryk, der er nødvendig for at presse et givet volumen af luftarten kvælstof igennem prøven. Permeabilitetsmålingerne er reproducerbare indenfor $\pm 10\%$.

Vurderingen og præsentationen af porøsitets- og permeabilitetsanalyserne for et reservoir er foretaget dels ved tabellering og dels ved grafisk fremstilling. Rutinemæssigt er afbildet porøsitet mod permeabilitet (fig. 8), og porøsitet eller permeabilitet mod sorteringsgrad, kornstørrelse og dybde. I denne rapport er porøsitet afbildet mod dybde (se fig. 11, 20, 27 og 34).

Porøsitets- og permeabilitetsværdier

Porøsitets- og permeabilitetsværdier for hvert enkelt reservoir er tabuleret i appendix 1 og angivet på fig. 11, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 34, 35, 36 og tavle 1–8.

For hver porøsitet er angivet hvilken logtype, der ligger til grund for beregningen, ligesom kerneanalyser er markeret.

Logporøsiteter er vægtede gennemsnit af punktvis beregnede porøsiteter. Porøsiteter og permeabiliteter fra kerneanalyser er vurderede middelværdier, da det indenfor de afstukne tidsrammer kun i be-

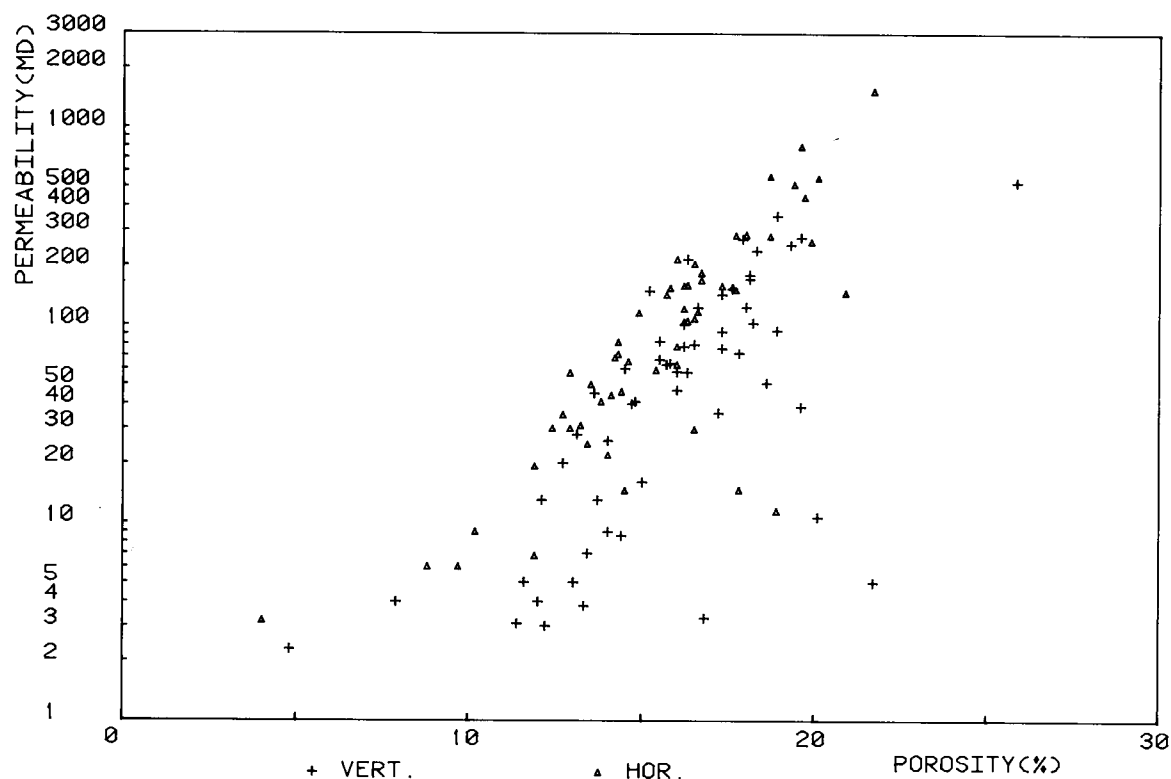


Fig. 8. Diagrammet illustrerer et generelt forhold mellem porøsitet og permeabilitet. Det ses, at permeabiliteten aftager med porøsiteten, og at permeabiliteten målt horisontalt generelt er højere end målt vertikalt. Både en direkte afhængighed mellem de to parametre og afvigelsen fra denne benyttes til at karakterisere og vurdere reservoiret.

grænset omfang har været muligt at foretage en detaljeret kerneanalyse med gennemgang af porøsitet- og permeabilitetsafhængighed af lithologi, kornstørrelsesfordeling samt sorterings- og hærtningsgrad. Dette medfører, at de tabulerede værdier fra kerneanalyser ikke er vægtede gennemsnitsværdier for reservoirslag baseret på vægtede gennemsnitsværdier for kernede intervaller i reservoiret, men at der ud fra analyserne er vurderet en repræsentativ gennemsnitsværdi. I vurderingen er der set bort fra maksimums- og minimumsværdier.

Net Sand

Net sand tykkelsen angiver en samlet tykkelse af reservoiret, dvs. samlet tykkelse af sandlagene i den undersøgte formation eller member. Tykkelsen er baseret på tolkning af petrofysiske logs. Net sand tykkelsen kan ikke umiddelbart anvendes i reservoirvurderingen, idet en tykkelsesangivelse kan være baseret på f.eks. tre ret ensartede sandlag, der er velegnede til produktion, eller være baseret på f.eks. femten tynde heterogene lag hvorfra en pumpning er vanskelig.

Inddelingen i lithostratigrafiske enheder, angivelse af dybde under havniveau og tykkelse er baseret på interne rapporter og publicerede data.

Midt dybde

Midt dybde værdien er benyttet til grafisk afbildning af porøsitetens afhængighed af dybden. En mere korrekt dybdeangivelse ville være midt dybde af reservoirslag; denne værdi er ikke anvendt i de foretagne beregninger af tidsmæssige årsager.

Reservoirvurderingen kan foretages med væsentlig større sikkerhed og større nøjagtighed, såfremt luftpermeabilitetsmålingerne får større reproducerbarhed og suppleres med måling af væskepermeabilitet ved anvendelse af simuleret formationsvand. Yderligere optimering af vurderingsgrundlaget fremkommer såfremt en hurtig og mere effektiv databehandling og grafisk præsentation af data bliver muliggjort samtidig med, at den nødvendige geologiske/petrofysiske fortolkning er tilstede. For at kunne foretage en eksakt vurdering af et reservoirs ydeevne er det

dog nødvendigt med en langvarig prøvepumpning direkte i borehullet.

Vurdering af reservoirlagenes kompaktion, hærdning og cementering samt eventuel sekundær opløsning og opspækning er vigtige faktorer ved vurderingen af et reservoirs ydeevne. Disse diagenetiske processer kan kun klarlægges efter langvarig præparation af bjergartsprøver, og selve analysearbejdet er også tidskrævende. Derfor er kun enkelte analyser gennemført, og det må forudses, at en detaljeret undersøgelse af potentielle områder må indbefatte et sådant analysearbejde.

Som anført under porositetsbestemmelse på basis af petrofysiske målemetoder er et større antal porositetsværdier udregnet ved brug af Spontaneous-Potential Log og Resistivity Log målinger. Usikkerheden på de beregnede porositetsværdier vil kunne nedbringes væsentligt, såfremt det bliver muligt at gennemføre en tilbundsående analyse af de petrofysiske logs indbyrdes relationer. I regioner med moderne målinger vil der kunne opstilles relationer mellem Neutron – Density porøsitet og Spontaneous-Potential – Resistivity porøsitet. De dermed fundne relationer vil muliggøre en mere nøjagtig porositetsbestemmelse i de talrige ældre borer, der i nærværende arbejde danner en stor del af grundlaget ved vurderingen af de geotermiske muligheder.

Dybdekortlægning

Som udgangspunkt for en vurdering af dybde og udbredelse af potentielle geotermiske reservoirer er der på grundlag af refleksionsseismiske data udført en række regionale isochron kort (tidskort) af markante og kontinuerte seismiske reflektorer, der har interesse i geotermisk sammenhæng. Kortlægningen omfatter 4–5 refleksioner fra det centrale og nordlige Jylland, Sydjylland, samt hovedparten af Sjælland. (Et eksempel er gengivet i tavle 9 og 10 i form af tidskort for top trias, Gassum Formationen). I disse områder findes en rimelig dækning af seismiske data af varierende kvalitet. Disse omfatter både ældre analog optagne single-fold linier, og moderne processerede multi-fold sektioner. I alt er der til grundlag for denne rapport interpreteret ca. 9000 km seismik fordelt på ca. 450 linier. De interpreterede reflektorer er korreleret til lithostratigrafiske grænser ved hjælp af well velocity surveys. De regionale tidskort (skala 1:500.000) er normalt kontureret med et kurveinterval på 0,05 sek., medens de dybere niveauer er kontureret med et kurveinterval på 0,1 el-

ler 0,25 sek. Kurveintervallet er et udtryk for den strukturelle kompleksitet og tidskortenes pålidelighed.

De ovenfor omtalte regionale tidskort har dannet grundlag for fremstilling af følgende generaliserede dybdekort: “Base Upper Cretaceous Limestone” (fig. 37), “Base Haldager Sand” (fig. 30), “Near Top Triassic” (fig. 23) og “Near Top Bunter Sandstone Formation” (fig. 14).

Dybdekonverteringen af tidskort er foretaget efter den simplest mulige metode, idet der er opstillet regionale hastighedsfunktioner for hver af de ovenfor nævnte horisonter ud fra sammenhørende værdier af two-way time og dybde for de borer hvor der eksisterer well velocity surveys. Selvstændige hastighedsfunktioner er derefter opstillet for de enkelte landsdele. For Sjællands vedkommende har det dog været nødvendigt at støtte sig til “stacking” hastigheder på grund af manglende borehulskontrol. Afvigelsen fra de opstillede hastighedsfunktioner til datasættene fra borerne har i enkelte tilfælde været op til 250 m, hvorfor det har været nødvendigt med lokale korrektioner. Ved dybdekonverteringen er der ikke foretaget migration af tidskortene, dvs. den nødvendige korrektion for laghældninger.

I områder med manglende seismiske data, eller hvor der ikke er foretaget systematisk kortlægning, er dybdekonturerne udtegnede med støtte i de spredte boredata og med kontrol af udvalgte seismiske sektioner. I disse områder er konturerne markeret som usikre eller hypotetiske.

Det skal fastslås, at de generaliserede dybdekort kun er tænkt som oversigtskort og derfor ikke bør anvendes som beslutningsgrundlag for lokalisering af nye geotermiske undersøgelsesboringer eller opstilling af detaljerede boreprognoser. Hertil er den anvendte dybdekonverteringsmetode for grov, idet der ikke er sket optimalt brug af de seismiske hastighedsinformationer.

Forud for en fremstilling af optimale dybdekort ud fra migrerede tidskort, vil det være nødvendigt at udføre en egentlig kortlægning af hastighedsfunktioner til en given refleksion. Dette inkluderer også brug af korrigerede hastighedsdata fra processeringen af feltdata. Seismiske hastigheder kan variere betragteligt selv inden for små afstande.

En sådan hastighedskortlægning er en meget tidsrøvende proces, som det ikke har været muligt at udføre regionalt indenfor rammerne af nærværende projekt.

Udover de strukturelle informationer kan det i om-

råder med borehulskontrol og moderne multi-fold seismik undertiden være muligt at lokalisere både top og bund af et potentielt reservoir, ligesom det eventuelt kan lade sig gøre at komme med meget generelle udsagn om den laterale variation i reservoirets parametre.

Egentlige kvantitative skøn over net sand tykkelse og porøsitet og porevæske sammensætning er ikke muligt med de eksisterende seismiske data.

Hertil kræves de mest moderne typer processering, herunder at bringe de seismiske impulser på symmetrisk form (wavelet processering) samt i stor udstrækning modelberegninger.

Beskrivelse af reservoirformationer

Hver enkelt af de udvalgte formationer er beskrevet med hensyn til lithostratigrafi, geologisk alder, lithologi, geometri, dybde, porøsitet, permeabilitet og temperatur. Bortset fra lithologi, der baserer sig på beskrivelse af eksisterende borekerner, er de andre reservoirparametre beskrevet i foranstående kapitler.

Af de i litteraturen formelt etablerede formationer, der kan betragtes som potentielle reservoirer for indvinding af geotermisk energi, behandles Skagerrak Formationen ikke særskilt i nedenstående oversigt. Den er en bassinmarginal dannelse, der er ækvivalent med de øvrige trassiske formationer (bortset fra Gassum Formationen). Bassincentralt danner den overgang til de grovkornede (sandede) formationer og udgør længst mod nördøst basis for Gassum Formationen. I nedenstående beskrivelser er Skagerrak Formationen derfor på de enkelte lokaliteter henregnet til den relevante formation, og dens data indgår dermed i den pågældende formation (se f. eks. appendix 1).

Ledsagende de enkelte formationsbeskrivelser findes kort, der viser bl.a. tykkelse af formationerne således som denne kan aflæses på borehulslogs, dvs. at der ikke er taget hensyn til laghældninger. Seismiske data er ikke benyttet ved fremstillingen af disse kort. Isopachkurverne må betragtes som visende den relative regionale variation, medens deres lokale værdier er behæftet med stor usikkerhed.

Fremstillingen af dybdekort og temperaturkort er beskrevet i særlige afsnit ovenfor.

Alle dybdeangivelser refererer til havniveau.

Palæozoikum

Af de nedenfor beskrevne og på kortet (fig. 9) angivne aflejringer er en del bestemt til en periode i palæozoikum. Desuden er medtaget lagserier af palæozoisk alder men uden nærmere specifikation, samt lag af formodet palæozoisk alder.

På kortet fig. 9, er aflejringer uden aldersbestemmelse betegnet med selvstændige signaturer, mens angivelsen af nedre perm er en formodet alder. Nedre perm i Ringe 1 og Rødby 2 inkluderer iøvrigt her en nedre enhed af arkose og konglomerater.

Vulkanske bjergarter er mere udbredte end det fremgår af kortet, fig. 9, f.eks. i Nøvling 1 og Rønde 1 består den silure aflejring af vekslende vulkaniter og lersten.

Kambrisk kvartsitisk sandsten

Fig. 9. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Antagelig ækvivalent til den bornholmske Balka Kvartsit.

Geologisk alder: Nedre kambrium eller eokambrium.

Lithologi: Lys grå kvartsitisk sandsten.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Der er kun fundet 6 m af den kambriske kvartsitiske sandsten i boringen Slagelse 1, men den er antagelig udbredt over større dele af Det danske Subbassin.

Dybden til top af den kvartsitiske sandsten er 2928 m.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten i den kvartsitiske sandsten er 4% og permeabiliteten er 3 mD.

Temperatur: I Slagelse 1 antyder såvel beregnede værdier som en målt BHT-værdi en temperatur på ca. 90°C. For Sjælland i øvrigt er kendskabet til temperaturforholdene meget ringe.

Sammenfattende bemærkninger: Kambriske kvartsitiske sandsten er kun fundet i en boring og er ikke gennemboret. De skønnes ikke at være egnede geotermiske reservoirer.

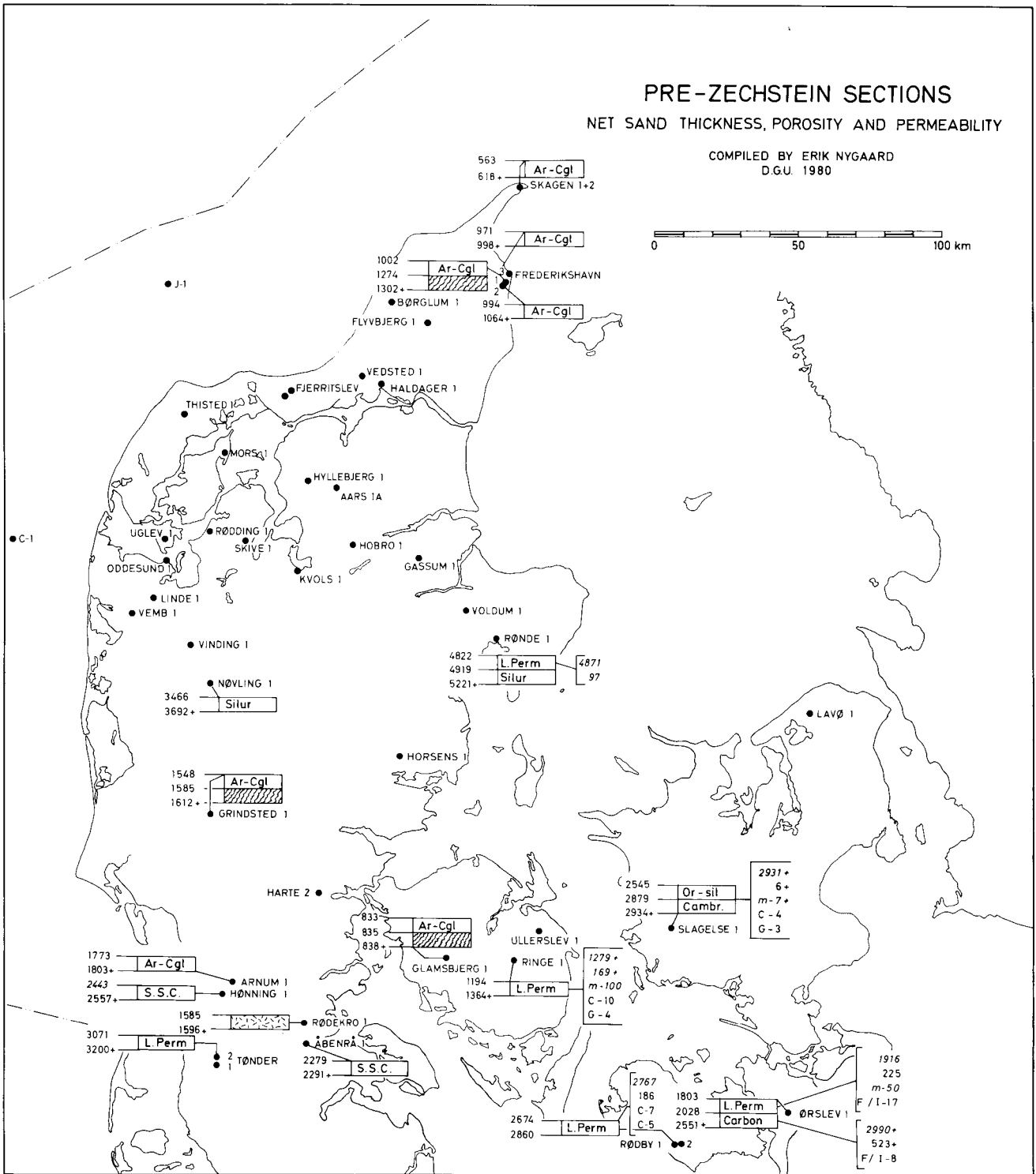
Karbon kalksten

Fig. 9. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Ingen.

Geologisk alder: Nedre karbon; viséen.

Lithologi: Kalksten, mergelsten og lersten med underordnede siltede/sandede indslag. Kalksten,



RESERVOIR PROPERTIES FOR GEOTHERMAL RESERVOIRS:

- 1619 Depth b. MSL to middle of formation / member
- 261 Thickness of formation / member, metres
- m-125 Net sand thickness, metres.
- S-38 Porosity % based on SP-log. Reliability low, values often too high.
- F-26 Porosity % based on FDC-log. Reliable.
- N-27 Porosity % based on CNL-log. Reliable
- Porosity % based on ITT-log. Less reliable
- C-25 Porosity %. From limited reservoir core data.
- G-75 Permeability to gas, mD. From limited reservoir core data.
- L-10 Permeability to liquid, mD. From limited reservoir core data.

FOR ALL PRE-ZECHSTEIN SECTIONS:

- 4822 ———— Depth interval b. MSL
- 4919+ ———— Unit not penetrated
- [L. Perm] Lower Permian (Rotliegendes)
- [Carbon] Carboniferous
- [Silur] Silurian
- [Or-Sil.] Ordovician - Silurian
- [Cambr.] Cambrian
- [S.S.C.] Sand-silt- and claystone (unknown age)
- [Ar-Cgl.] Arkose - Conglomerate (unknown age)
- [Extrusive rock] Extrusive rock
- [Basement (gneiss)] Basement (gneiss)

Fig. 9. Præ-zechstein aflejringer, samt deres net sand tykkelse, porøsitet og permeabilitet.

mergelsten og lersten veksler, men kalkstenen dominerer i såvel de øverste 50 m som de nederste 100 meter af den gennemborede lagserie. Kalkstenen er hård, meget tæt, rådgrå til gråsort og rig på fragmenter af fossiler og andre kalkkorn. Kalkkornene udgør op til 30% af bjergarten, som herudover består af meget finkornet eller krystallinsk kalk.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Karbon kalksten er kun fundet i boringen Ørslev 1 og må formodes kun at være til stede i et lille område syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Der er anført en 525 m tyk lagserie af hvilke kalksten udgør max. 200 m.

Toppen af de karbone kalksten findes ved 2035 m.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten i de bedste afsnit af karbonaten er 8%.

Temperatur: Syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen vurderes temperaturen for 2000 m niveauet normalt at være 60–70°C.

Sammenfattende bemærkninger: Kalkstenen er tæt og veksellejret med lersten. Den skønnes ikke at være et egnet geotermisk reservoir. Datamængden er meget lille.

Rotliegendes sandsten

Fig. 9. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Ingen.

Geologisk alder: Nedre perm, rotliegendes.

Lithologi: Sandsten og siltsten med indslag af ler. Farverne er rødbrune, og der er stedvist lidt kalksten og anhydritkonkretioner. De sandede-siltede lag har ofte en finkornet matriks, især syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Rotliegendes sandstenen er især fundet syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen, men kun sporadisk på Højderyggen og i Det danske Subbassin. Den konstaterede tykkelse er syd for Højderyggen op til 225 m, på Højderyggen 170 m, og i Det danske Subbassin knapt 100 m.

Top af rotliegendes sandstenen ligger syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen fra 1800 til 3100 m, på Højderyggen ved 1200m, og et enkelt sted centralt i Det danske Subbassin ved 4800 m.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten synes i højere grad at afspejle lokale variationer i lithologi end en direkte dybdeafhængighed. Porøsiteten ligger generelt omkring 10%, med en enkelt undtagelse på knapt 20%. Permeabiliteten er ca. 4 mD.

Temperatur: Sandstenens temperatur vil for dybdeintervallet 1800–3100 m typisk være mellem 60 og 80°C, over Højderyggen ca. 40°C (1200 m) og i Subbassinet omkring 140°C (4800 m).

Sammenfattende bemærkninger: Rotliegendes sandstenen skønnes at være af ringe værdi som geotermisk reservoir. Datamængden er overordentlig begrænset.

Zechstein kalksten syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen

Fig. 10. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Z-1, Z-2 og Z-3 Karbonat Formationerne, Mellem Karbonat Member i Z-1 Anhydrit Formation (Clark og Tallbacka, 1980).

Geologisk alder: Øvre perm, zechstein.

Lithologi: Kalksten, der indgår som underordnet bestanddel i en serie cyklisk aflejret kalksten, anhydrit og stensalt.

Tre typer kalksten dominerer: En meget finkornet, en med op til 50% kalkkorn i en finkornet mellemmasse, og en med overvejende fine korn, som oprindeligt har været holdt sammen af algetråde eller i få tilfælde af bryozoer.

De groveste kalkstensaflejringer findes i et bælte tæt ved og parallelt med Ringkøbing-Fyn Højderyggen, medens de finkornede kalksten forekommer sydligere i Det nordtyske Bassin.

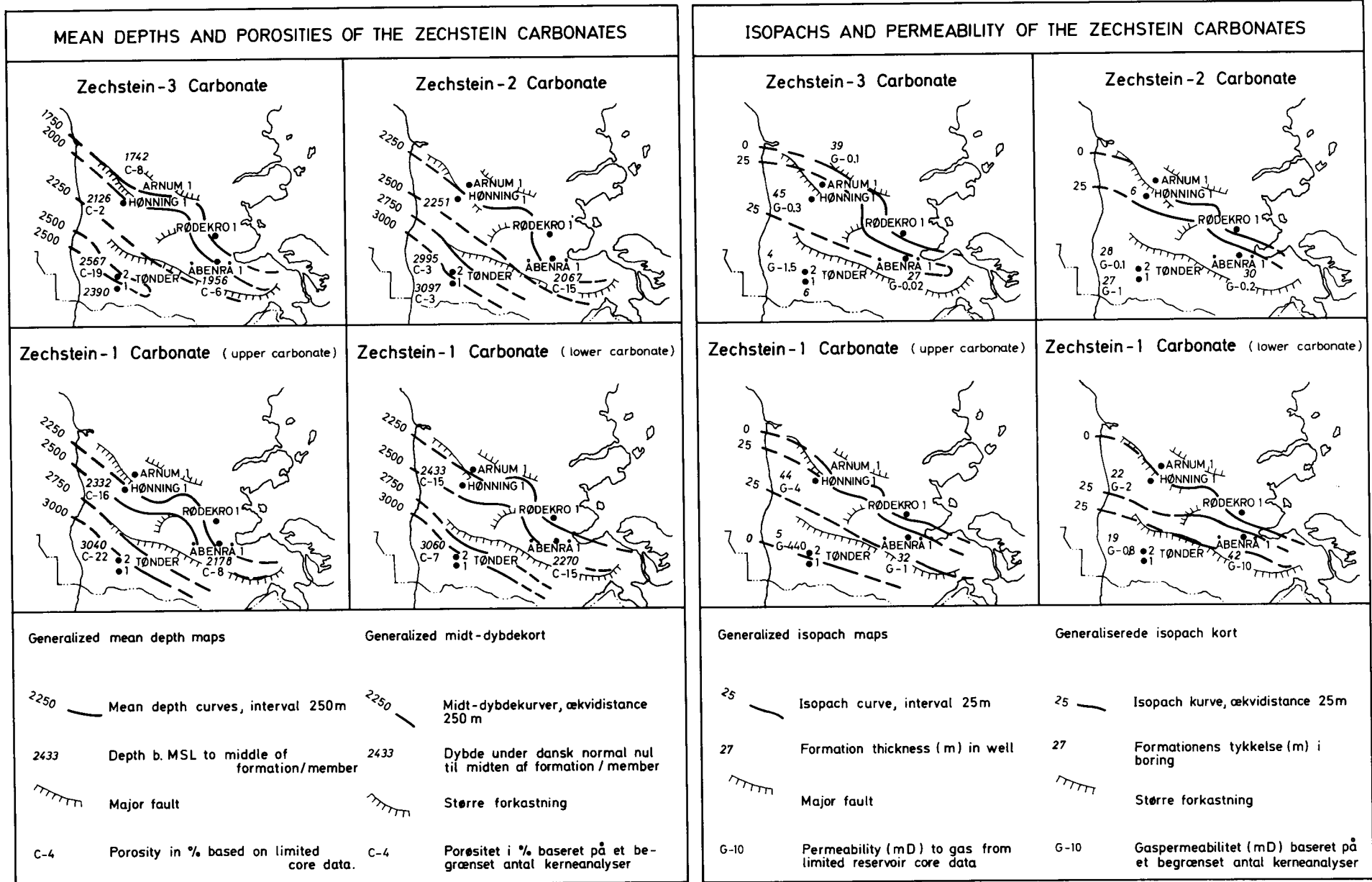
Udbredelse, tykkelse og dybde: Aflejringsområdets centrale del, med de største zechstein lagtykkelser, ligger i Nordtyskland, og lagserien kiler ud op mod Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Kalkstens-formationerne er tykkest langs randen af aflejringsområdet, – langs Ringkøbing-Fyn Højderyggen, samlet 125 meter. Dybden til formationerne varierer fra 2000 til 3000 meter.

Porøsitet og permeabilitet: Kalkstenens porøsitet er lav, ca. 10%, ligesom luftpermeabiliteten er nede på 1 mD. Diagenetiske omdannelsesprocesser har i dele af lagserien forårsaget opløsning og hulrumsdannelse. Små hulrum samt sprækkedannelser skaber sekundær porøsitet og permeabilitet, hvis størrelse er vanskelig at anslå.

Temperatur: I dybdeintervallet 2000 til 3000 m anses temperaturen i det aktuelle område normalt at være mellem ca. 60°C og ca. 90°C.

Sammenfattende bemærkninger: Kendskabet til formations reservoir egenskaber er ringe, men det er muligt, at hulrum og sprækker kan forårsage at formationerne kan udnyttes til geotermisk produktion.



Erik Nygård D.G.U. 1980

0907-80-02

Fig. 10. Kort over zechstein karbonatformationernes midt dybde, tykkelse, porøsitet og permeabilitet.

Trias

Bunter Sandsten Formation

Fig. 11–14. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Bacton Group, Bunter Sandsten Formation (Bertelsen 1980).

Geologisk alder: Nedre trias, jakutien – nedre olenikien.

Lithologi: Rødbrune og gulbrune, finkornede sand-, silt- og lersten, der lokalt er stærkt kalk-, anhydrit- og glimmerholdige. Varierer fra finkornet sand- og siltsten syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen til fintil grovkornet sandsten i Det danske Subbassin. Længere mod nord findes Skagerrak Formationens grovkornede sandsten, der her behandles sammen med Bunter Sandsten Formationen.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Bunter Sandsten Formationen findes i Det danske Subbassin, Det dansk-polske Trug og Det nordtyske Bassin samt delvis over Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Tykkelsen er mindre end 300 m, dog undtaget deocentret i Det danske Subbassin, hvor mægtigheden

af Bunter Sandsten Formation / Skagerrak Formationen overskrider 900 m.

Over Ringkøbing-Fyn Højderyggen er lagserien tynd og mangler enkelte steder helt.

Net sand tykkelsen, der er vigtig i reservoirbedømmelsen, er tilsyneladende lokal betinget.

Bunter Sandsten Formationens top findes i 1000–1500 meters dybde over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, faldende til cirka 2000 m i Sønderjylland i Det nordtyske Bassin. Centralt i Det danske Subbassin overstiger dybden til top af Bunter Sandsten/Skagerrak Formationen 5000 meter.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten aftager med dybden. I 1000–2000 m er porøsiteterne 20–30% medens de under 3000 m er lavere end 15% (fig. 11). Luftpermeabiliteter aftager med aftagende porøsitet. Højeste luftpermeabilitet er ca. 1000 mD.

Bedste porøsiteter og permeabiliteter i Bunter Sandsten Formationen må forventes umiddelbart nord og syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen, hvor formationen ikke ligger så dybt. Længst mod nord i Det danske Subbassin forventes Skagerrak Formationen lokalt at have gode reservoirkarakterer.

Temperatur: Over Ringkøbing-Fyn Højderyggen

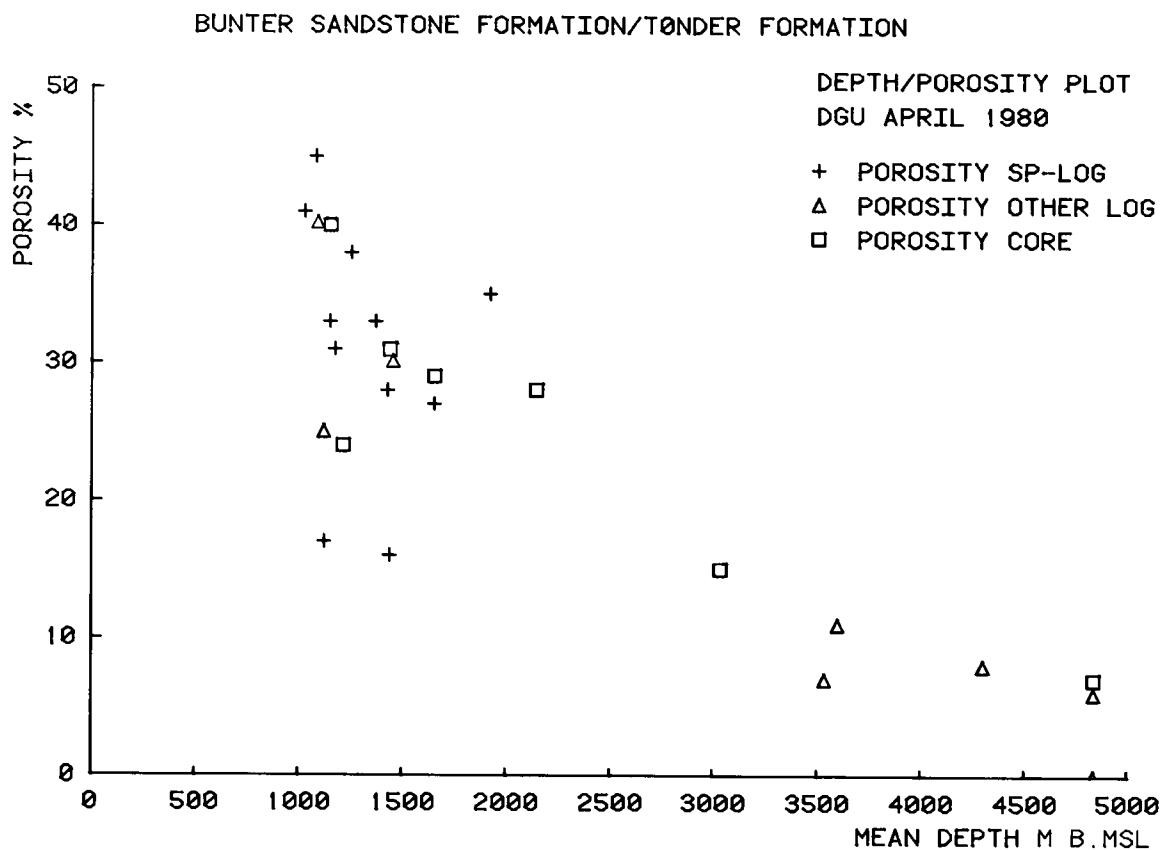


Fig. 11. Porositetsværdier for Bunter Sandsten Formation/Tønder Formation plottet mod dybden. Det ses, at porøsiteten generelt aftager med dybden. Hvert punkt repræsenterer en boring. Værdierne stammer fra tabellen i appendix 1.

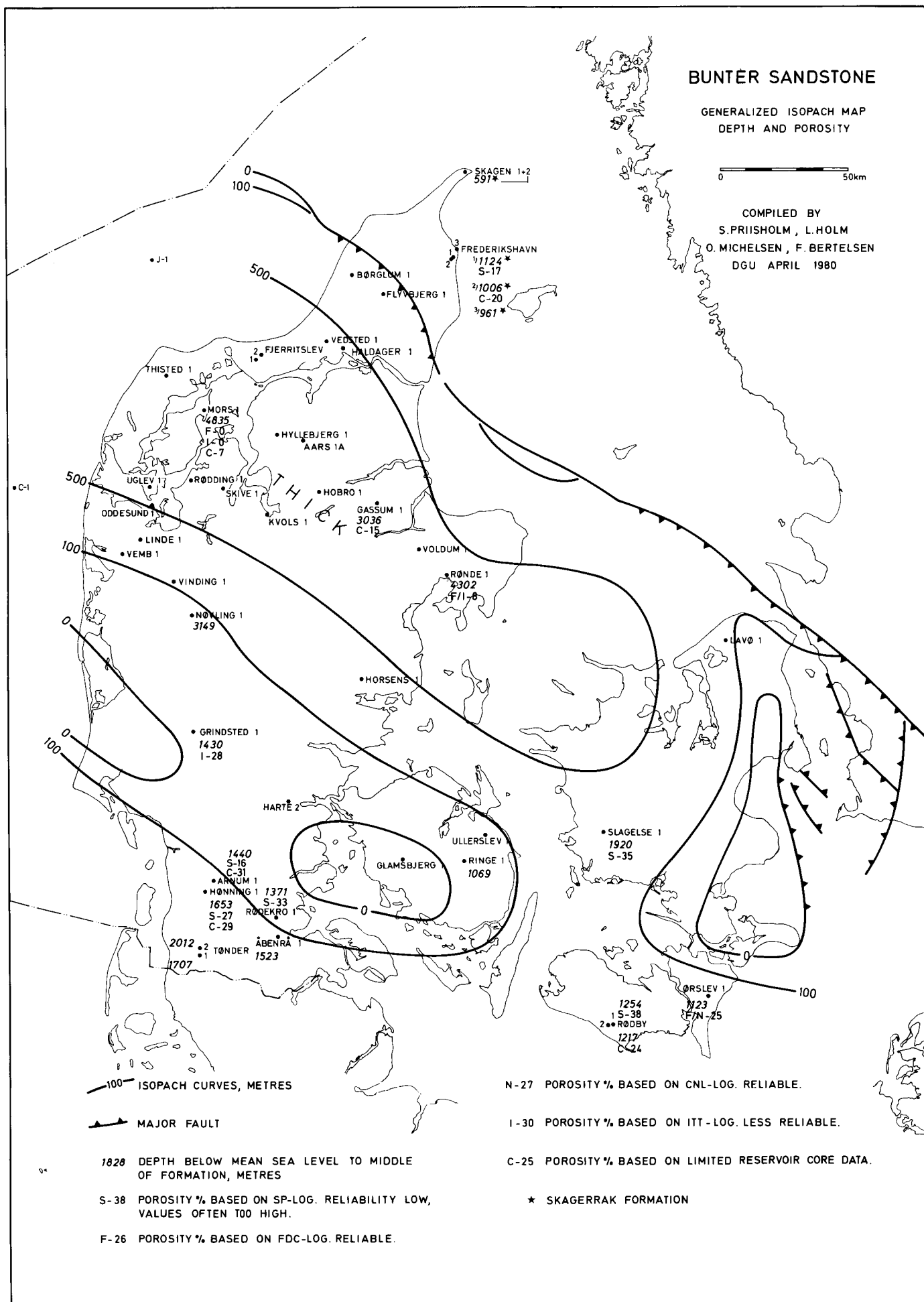


Fig. 12. Bunter Sandsten Formationen. Generaliseret tykkelse, dybde og porøsitet.

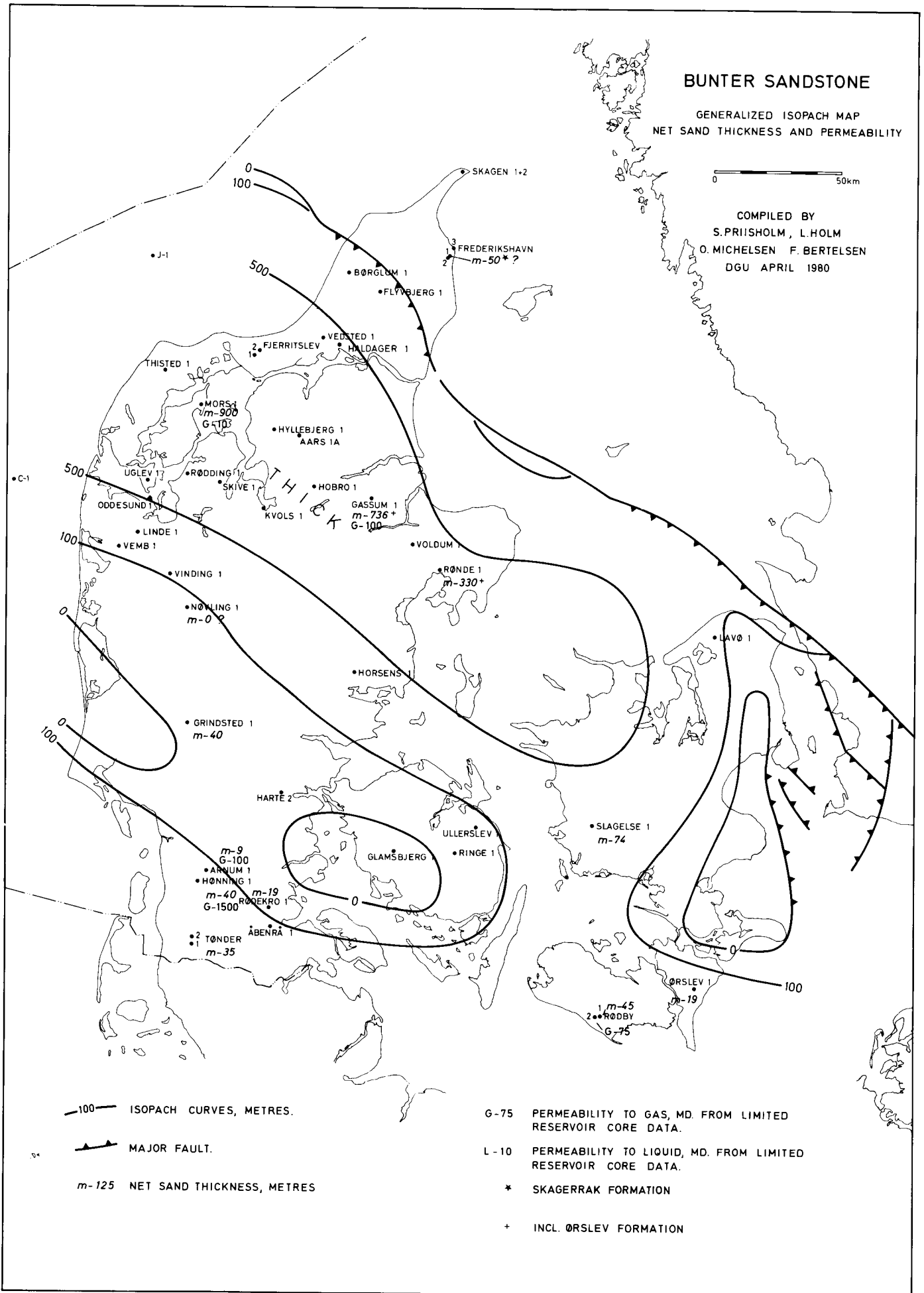








Fig. 13. Bunter Sandsten Formationen. Generaliseret tykkelse, net sand tykkelse og permeabilitet.

NEAR TOP BUNTER SANDSTONE FORMATION

GENERALIZED DEPTH MAP
CONTOUR INTERVAL 1000 M

-  FAULT
-  SALT PIERCEMENT
-  BUNTER SANDSTONE FORMATION THIN OR ABSENT
-  UNCERTAIN CONTOURS
-  HYPOTHETICAL CONTOURS
-  1064 DEPTH FROM WELL DATA
- H HIGH
- L LOW

10 0 50 km

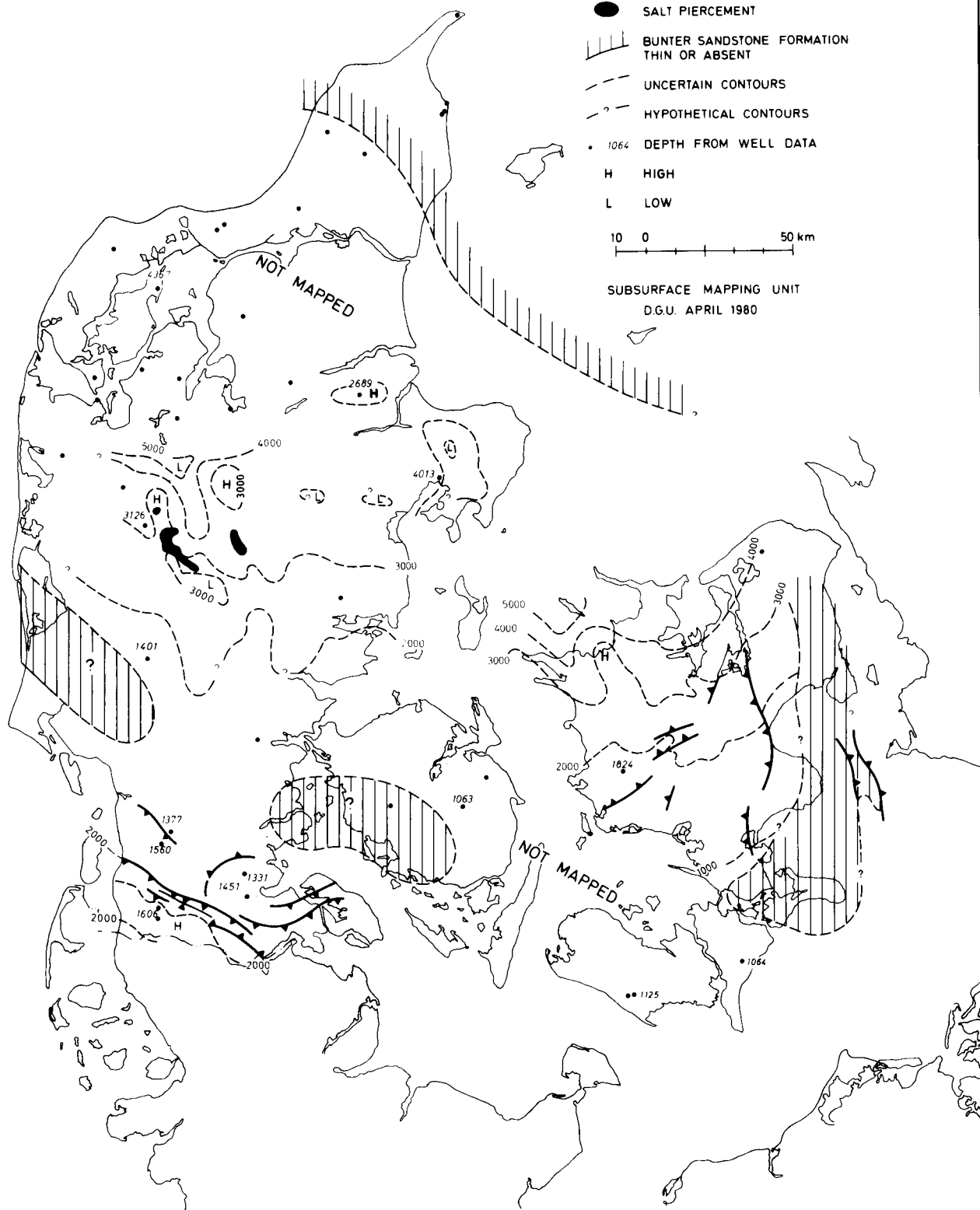
SUBSURFACE MAPPING UNIT
D.G.U. APRIL 19801955
• C-1

Fig. 14. Generaliseret dybdekort for en flade nær top af Bunter Sandsten Formationen.

Approximate Base Triassic
Isotherms Model A
Contour Interval 20°C

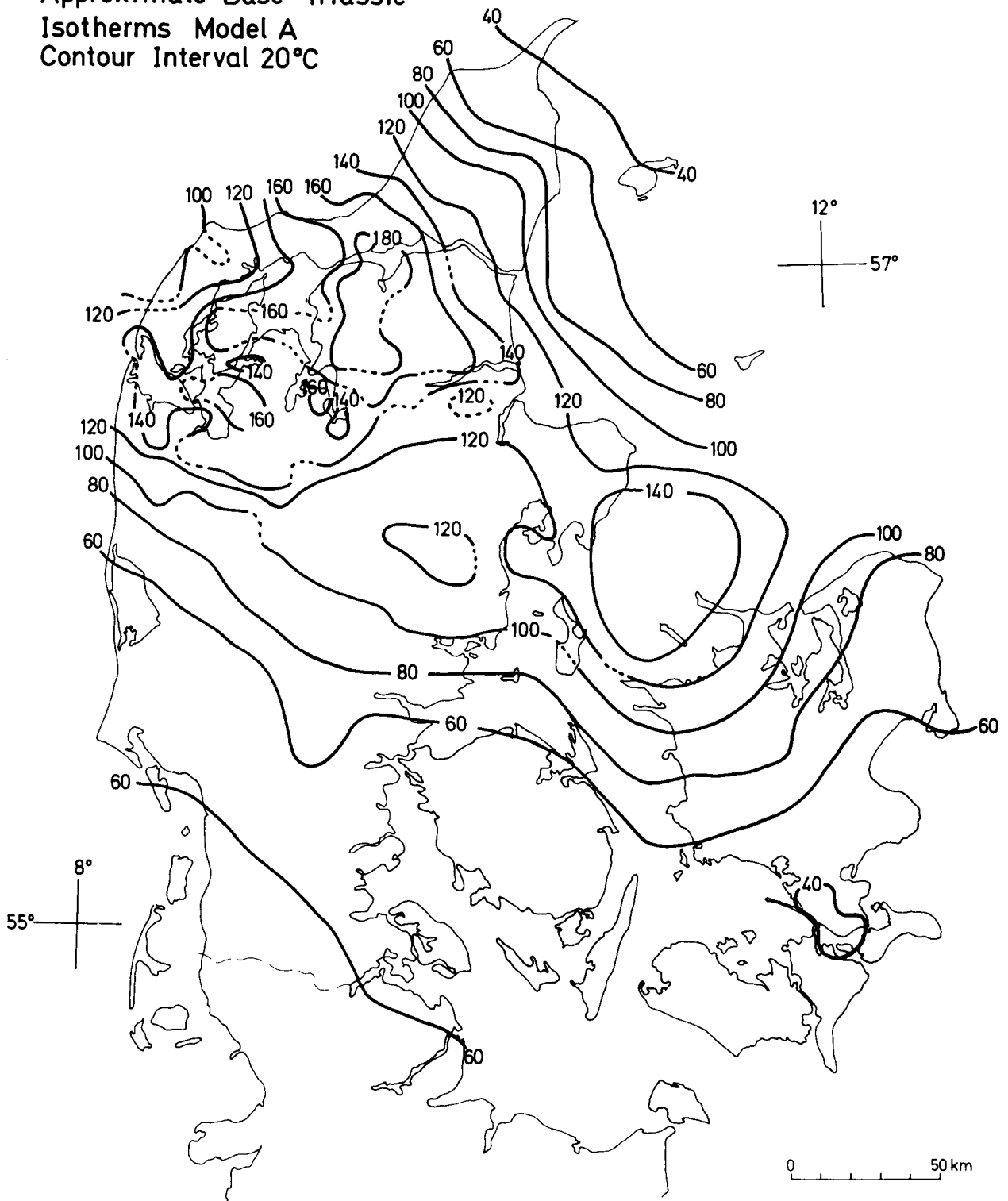


Fig. 15. Isothermer for basis trias. Model A.

vurderes temperaturen at være 30–50°C, i Sønderjylland 60–80°C. I Mors 1 boringen giver korrigerede BHT-værdier temperaturer mellem ca. 110°C og ca. 140°C. Centralt i Subbassinet overstiger temperaturen 140°C. Model A isotermer for en niveauflade, der approksimativt udgør basis af trias, fremgår af fig. 15.

Sammenfattende bemærkninger: Dybdekortet for Bunter Sandsten Formationen er behæftet med væsentlig usikkerhed, idet relevante hastighedsfunktioner til brug for dybdekonverteringen i det væsentlige har manglet.

Muligheden for vurdering af reservoirparametrene er begrænset, idet Bunter Sandsten Formationen kun er kendt fra spredte boringer, kernedata er få og porøsiteter i det væsentlige begrænset til beregninger ud fra SP-resistivitetsmålinger.

Om end kendskabet til formationen er begrænset skønnes det, på det foreliggende grundlag, at Bunter Sandsten Formationen har geotermiske reservoirkarakterer.

Ørslev Formation

Fig. 16.

Lithostratigrafisk inddeling: Lolland Group, Ørslev Formation (Bertelsen 1980).

Geologisk alder: Nedre – mellem trias (röt), øvre olenikien – nedre anisien.

Lithologi: Formationen kan deles i en nedre og en øvre del. I den sydlige del af landet består den nedre del af stensalt og anhydrit mellemløjret af rødbrun – grå lersten. Mod nord veksler lys grågrøn dolomitisk kalksten med lersten og mergelsten. Den øvre del af formationen består af siltholdig, rødbrun lersten. Indeslutninger af anhydrit forekommer i hele formationen. Ligeledes forekommer siltsten, der på overgangen til Skagerrak Formationen i Det danske Subbassin kan dominere dele af lagserien.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Ørslev Formationen findes i størstedelen af landet (fig. 16).

Tykkelsen er i almindelighed 100–300 meter, tyndere over Ringkøbing-Fyn Højderyggen og over 400 meter tyk i den centrale del af Det danske Subbassin.

Net sand tykkelsen er inkluderet i og tabelleret under Bunter Sandsten Formationen. Den totale mægtighed af sand-siltsten er 50–150 m i overgangszonen til Skagerrak Formationen.

Ørslev Formationens top findes i 800–1500 meters dybde over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, faldende til 1800–2000 meter i den danske del af Det nordtyske Bassin. Centralt i Det danske Subbassin, i

overgangszonen til Skagerrak Formationen, ligger top af formationen dybere end 4000 m.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten er ringe, 3–5%. Permeabiliteten antages at være ubetydelig på grund af bjergartens finkornethed.

Temperatur: Centralt i Det danske Subbassin anses formationens temperatur for dybder over 4000 m typisk at være over 120°C. Over Ringkøbing-Fyn Højderyggen 35–50°C stigende til 60–70°C syd for Højderyggen.

Sammenfattende bemærkninger: Kendskabet til formationens reservoirgenskaber er ringe, men det skønnes at reservoirkaraktererne er for dårlige til geotermisk udnyttelse. En undtagelse kan være overgangen til Skagerrak Formationen hvor nedre og mellem trias skal vurderes samlet.

Falster Formation

Fig. 17.

Lithostratigrafisk inddeling: Lolland Group, Falster Formation (Bertelsen 1980).

Geologisk alder: Mellem trias (muschelkalk); anisien – nedre ladinien.

Lithologi: Vekslede grå og grågrønne, sjældnere brune, lersten, mergelsten og kalksten. Anhydrit forekommer spredt. Den nedre del af formationen er generelt rigere på kalksten, medens den øvre er mere leret. I Det danske Subbassin, nær overgangen til Skagerrak Formationen, forekommer sandede indslag.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Falster Formationen findes i størstedelen af landet (fig. 17).

Tykkelsen af formationen er generelt 100–200 meter, medens net sand tykkelsen er yderst minimal. Enkelte 5 meter tykke sand-siltstenslag findes i overgangszonen til Skagerrak Formationen. Falster Formationens top findes i 800–1200 meters dybde over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, faldende til 1500 meter mod Det nordtyske Bassin. I Det danske Subbassins centrale dele ligger formationen dybere end 3700 meter.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten er lav, omkring 10%. På baggrund af formationens blandede lithologi med kalksten og anhydrit kan det forventes, at sandstenslag er delvis cementerede og har ringe permeabilitet.

Temperatur: Syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen vurderes temperaturen at være omkring 60°C faldende over Højderyggen til 30–40°C og stærkt stigende til over 100°C centralt i Subbassinet.

Sammenfattende bemærkninger: Kendskabet til

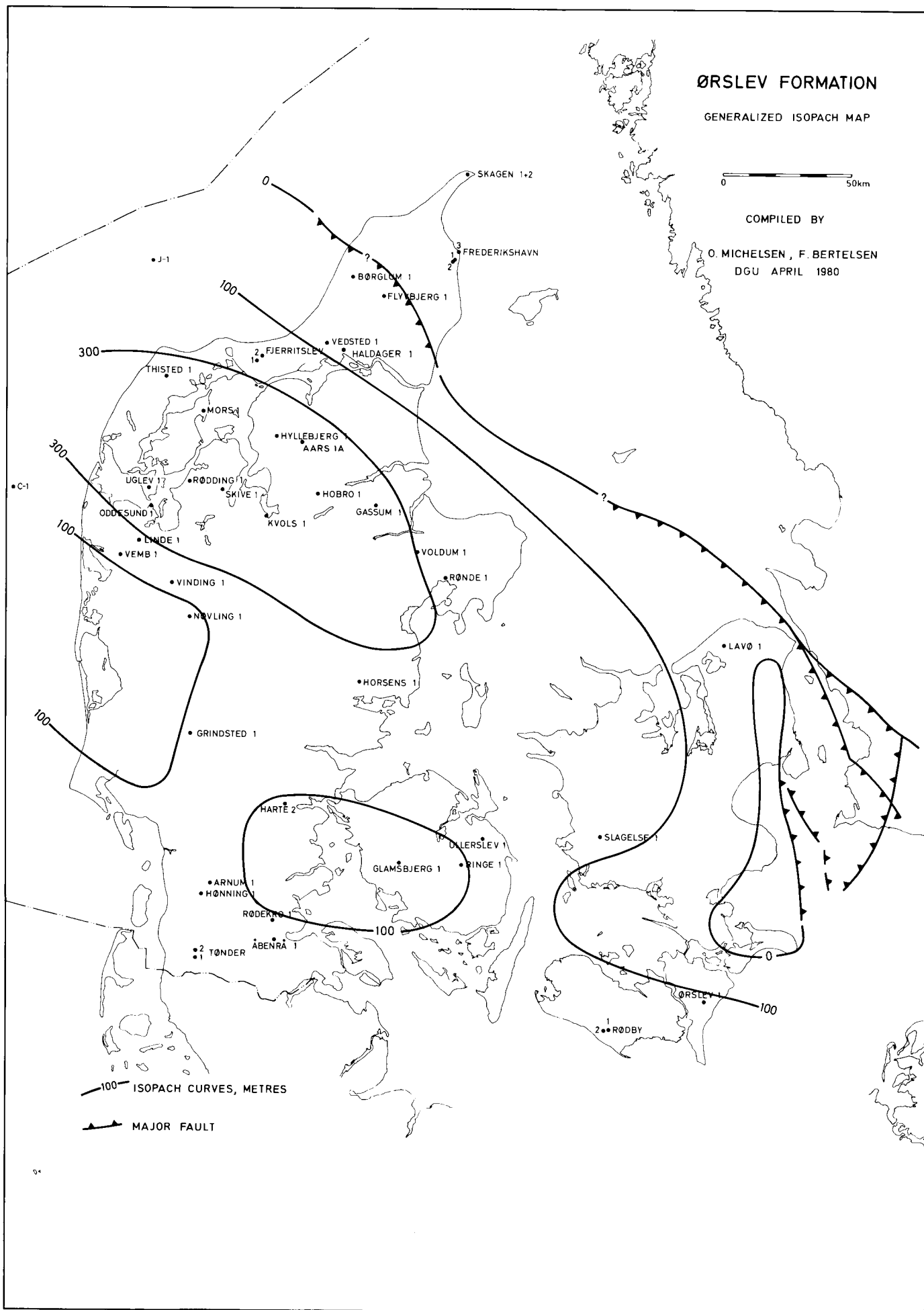


Fig. 16. Ørslev Formationen. Generaliseret tykkelse.

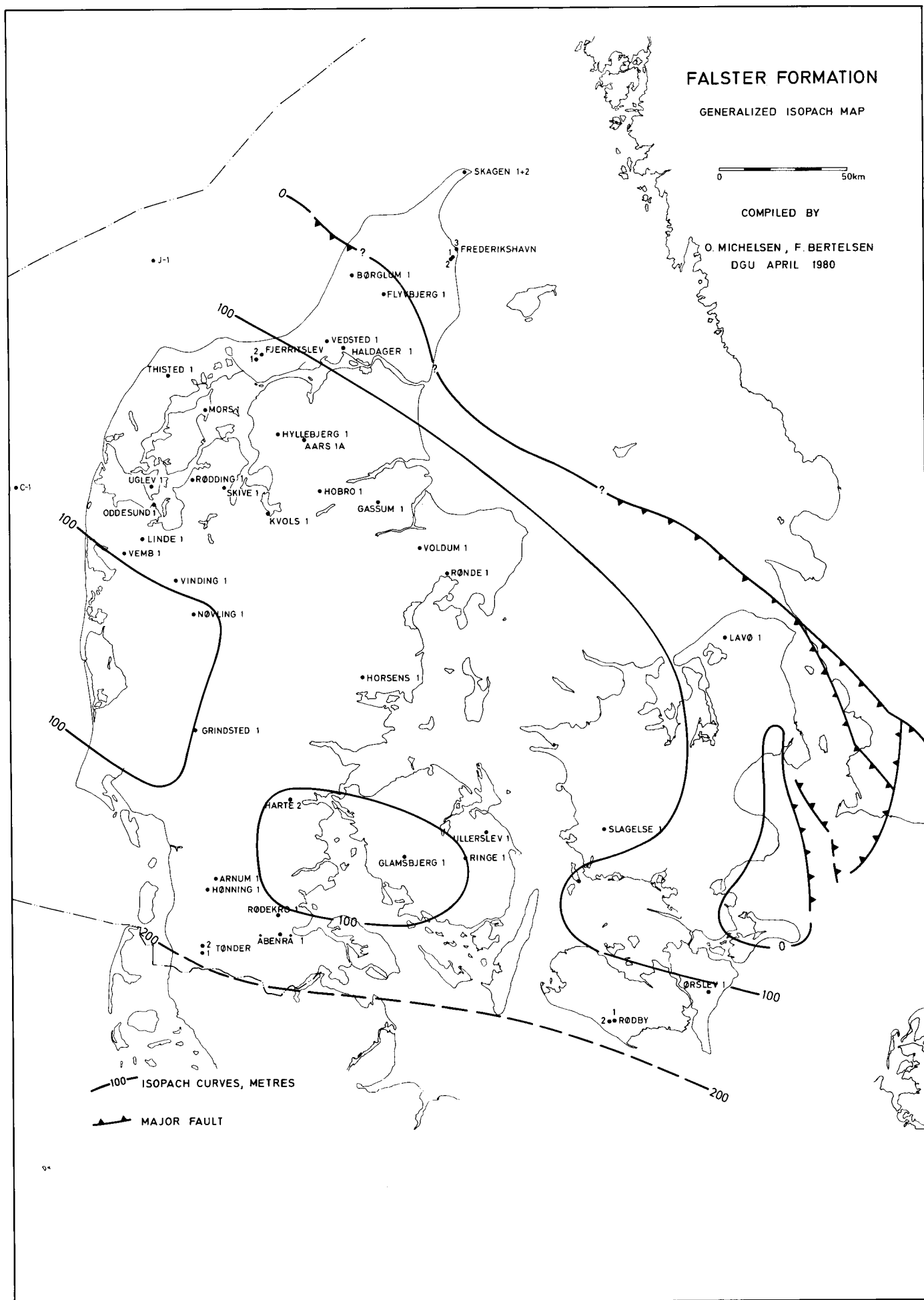


Fig. 17. Falster Formationen. Generaliseret tykkelse.

reservoiregenskaber i formationen er ringe, men det skønnes, at formationen ikke er egnet til geotermisk udnyttelse.

Tønder Formation

Fig. 11, 18–19. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Jylland group, Tønder Formation (Bertelsen 1980).

Geologisk alder: Mellem trias (nedre keuper); øvre ladinien.

Lithologi: Rødlig brun til grønlig, siltholdig lersten med spredte anhydritindeslutninger. Øverst i formationen findes enkelte, velafgrænsede lag af grågrøn og rødbrun siltholdig, finkornet sandsten.

Mod nord, i Det danske Subbassin, tiltager sandindholdet samtidig med at lagene bliver hyppigere, men tyndere og sorteringsgraden dårligere.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Tønder Formationen findes i størstedelen af landet, men kan mangle over Ringkøbing-Fyn Højderyggen. Mod nord-nordvest går formationen over i Skagerrak Formationen. I den sydøstlige del af Det danske Subbassin ændrer lagene karakter og henføres til Ringe Beds (se Bertelsen 1980). Sandlagene i Ringe Beds er her medregnet til Tønder Formationen.

Gennemsnitlig tykkelse er 100–300 meter. Net sand tykkelsen dog kun 20–40 meter, stigende til 100 meter i Det danske Subbassin.

Dybden til top af formationen er 1000–1500 meter i Sønderjylland, mindre over Ringkøbing-Fyn Højderyggen, ca. 800–1000 meter. I Det danske Subbassin overstiger dybden 3500 meter.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsitetsværdierne er meget svingende. I velafgrænsede sandlag, der findes i Sønderjylland, er porøsiteten 20–30% og derover. Porøsiteten er lavere (fig. 18) i Det danske Subbassins sandede aflejringer. De lave porøsiteter kan skyldes sandlagenes lerindhold samt graden af cementering med bl.a. calcit og anhydrit. Porøsiteten aftager med dybden, fra 30–40% i 1000 meters dybde til 10% i 3500 meter (fig. 11). I bjergarter med gode reservoirkarakterer er luftpermeabiliteten 1000 mD, men i lav-porøse sandlag vil permeabiliteten være markant lavere.

Ændret aflejringsstype samt graden af cementering kan bevirke, at porøsitet og permeabilitetsforholdene ændrer karakter over korte afstande.

Temperatur: De højeste temperaturer opnås centralt i Det danske Subbassin, hvor der kan forventes over 100°C. På nordflanken af Ringkøbing-Fyn Højderyggen anses ca. 75°C (2300 m) for at være typisk,

og hvor formationen findes over Højderyggen kun 30–40°C stigende til ca. 50°C syd for Højderyggen.

Sammenfattende bemærkninger: Muligheden for vurdering af reservoirparametrene er begrænset, idet Tønder Formationen kun er kendt fra spredte boringer, kernedata er få og porøsiteter i det væsentlige begrænset til beregninger ud fra SP-resistivitetmålinger.

Om end kendskabet til formationen er begrænset skønnes det på foreliggende grundlag, at Tønder Formationen lokalt har geotermiske reservoirkarakterer.

Gassum Formation

Fig. 20–26. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Mors Gruppe, Gassum Formation (Bertelsen 1978, 1980).

Geologisk alder: Gassum Formationen er diakron. I den centrale del af Det danske Subbassin er den af øvrige triassisk alder (rhaetien) mens den i den nordlige del af bassinet hovedsagelig er af nedre jurassisk alder (hettangien – sinemurien).

Lithologi: Overvejende fin- til mellemkornede, lysegrå sandsten, der veksler med mørkere farvede lersten og siltsten. Små kullag forekommer spredt. Formationen kan generelt underinddeles i tre enheder, en nedre og en øvre sandet enhed med en mellemliggende leret og siltet del. Lokalt kan yderligere enheder forekomme. Formationen bliver mere finkornet og leret mod syd.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Gassum Formationen findes primært i Det danske Subbassin. Her har den en generel tykkelse på 100–200 m. I to områder (Nordsjælland og Ålborg området) overstiger tykkelsen 200 m, mens formationen tynder ud mod Den fennoskandiske Randzone og Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Net sand tykkelsen kan variere meget lokalt. Generelt er den over 50 m i den centrale del af Det danske Subbassin (Sydvendsyssel / Himmerland-området) og i Nordsjælland. Syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen er der lokalt over 50 m net sand (sydlige Lolland-Falster).

Gassum Formationen ligger dybest i den centrale del af Det danske Subbassin (syd for Limfjorden), hvor dybden til top af formationen varierer fra 2500 m til 4000 m. Dette område er samtidig stærkt influeret af saltstrukturer, hvorfor dybden kan variere meget lokalt. I et bælte parallelt med Den fennoskandiske Randzone, strækkende sig fra Djursland til Nordsjælland overstiger dybden 2500 m. Fra disse to

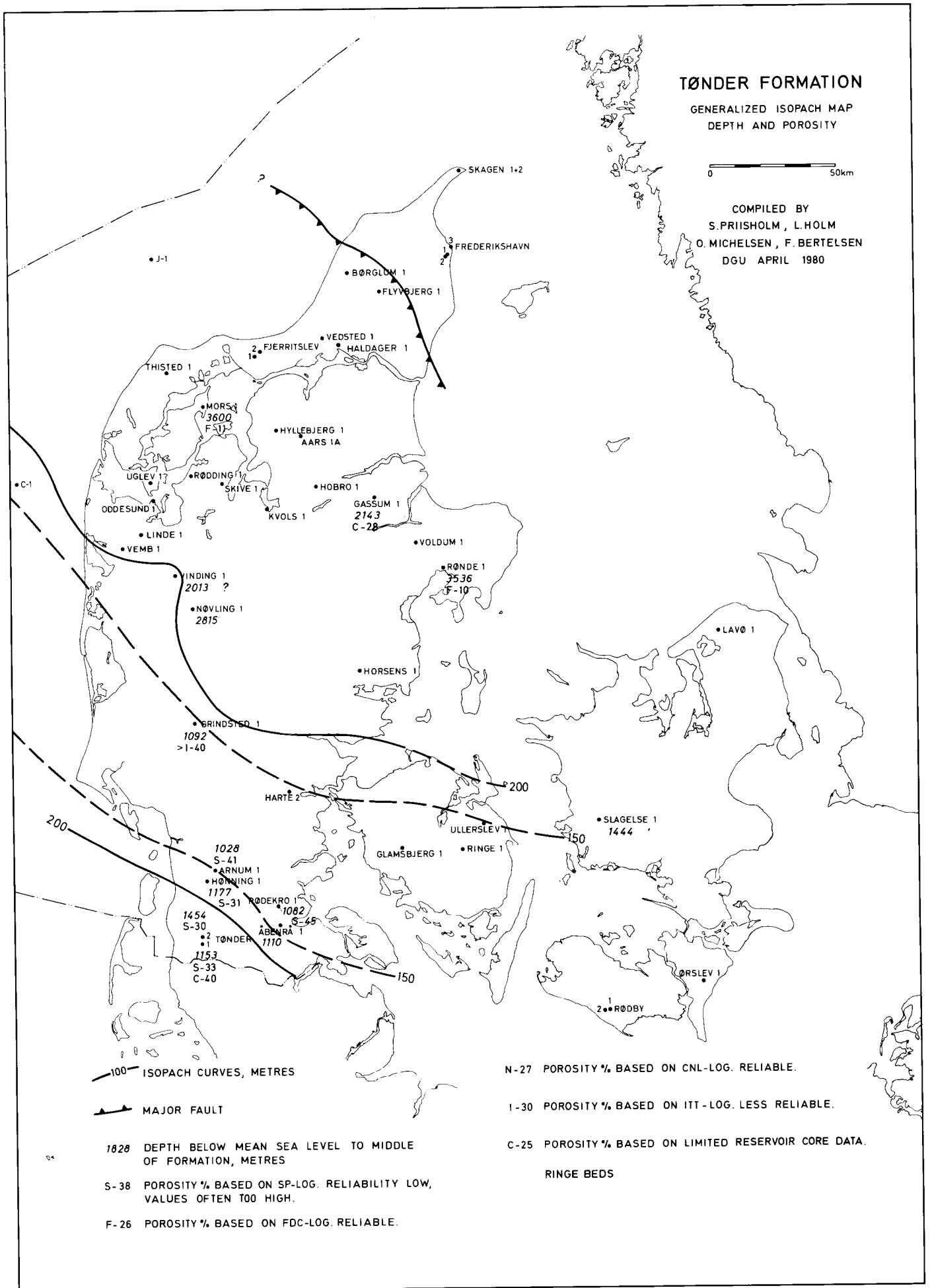


Fig. 18. Tønder Formationen. Generaliseret tykkelse, dybde og porøsitet.

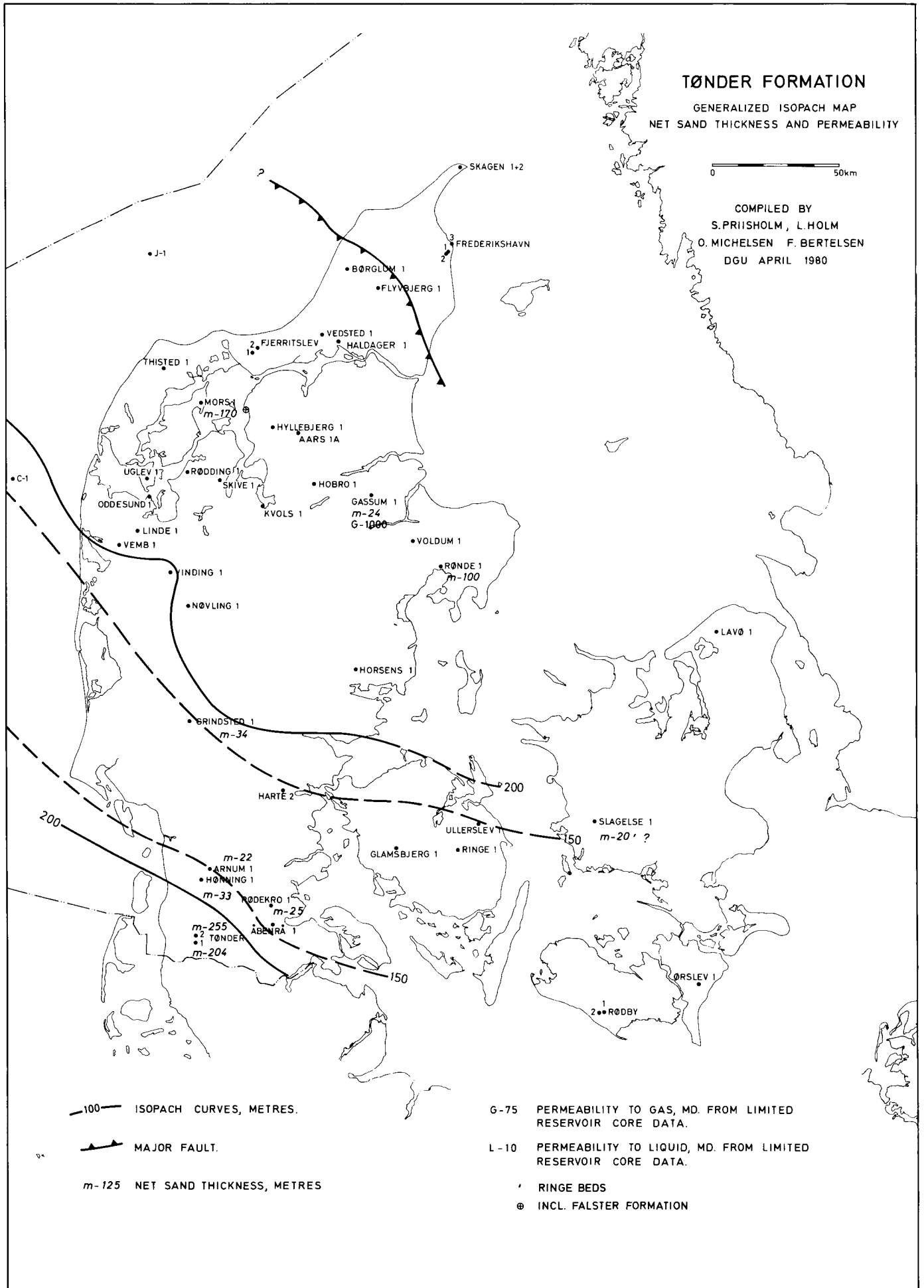


Fig. 19. Tønder Formationen. Generaliseret tykkelse, net sand tykkelse og permeabilitet.

områder aftager dybden jævnt mod syd og mod nordøst til 500–1000 m.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten aftager med dybden. Ned til 1500 m er porøsiteten 30–40%, omkring 2000 m ca. 25% og ved 3000 m ca. 12%. Permeabiliteten aftager generelt med aftagende porøsitet og dermed med dybden. Da andre faktorer, så som sandstenens kornstørrelse og lerindhold, også har indflydelse på permeabiliteten, kan en generel afhængighed af porøsiteten og dybden ikke altid etableres. Dette gælder sedimenterne i Frederikshavn 2 og Skagen 2, som har en meget lav permeabilitet i forhold til porøsiteten. De øvrige data viser at væskepermeabiliteten varierer fra 8 mD i 3200 m's dybde til 300 mD i 1500 m's dybde.

Temperatur: I 1000, 2000 og 3000 m vurderes Gassum Formationens temperatur typisk at ligge inden for intervallerne henholdsvis 35–45°C, 60–75°C og 80–110°C. De højeste temperaturer på 100–120°C forventes centralt i Det danske Subbassin, hvor der i en dybde på ca. 3300 m er målt 107°C. Model A isotermerne for nær top trias (fig. 24) anses for at give det bedste grundlag for en regional vurdering. Centralt i Subbassinet er der fundet god overensstemmelse mellem disse modelværdier og de må-

leresultater, der foreligger. Størst usikkerhed er knyttet til områderne i det nordligste Jylland, ved Ringkøbing-Fyn Højderyggen og på Sjælland, hvor model B og C isotermerne (fig. 25 og 26) må medtages i vurderingen. For områder, hvor dybden og den geotermiske flux er konstante, vil en overlejring af Fjerritslev Formationen med stor mægtighed og øvre kridt kalksten med lav mægtighed give optimale temperaturbetingelser. Det skyldes Fjerritslev Formationens lave og kalkstenens forholdsvis høje ledningsevne. Over store områder i Nordjylland er temperaturen mellem 70 og 100°C.

Sammenfattende bemærkninger: Dybdekortet for Gassum Formationen er i Nordjylland og på Sjælland behæftet med ringe usikkerhed, mens resten af landet har en større usikkerhed på grund af mangelfuld seismisk dækning og/eller hastighedsanalyser.

Muligheden for vurdering af reservoirparametrene er rimelige i det nordjyske område. Dog er der nogen usikkerhed med hensyn til permeabiliteten i dybdeintervallet 2–3 km, idet mængden af kernemateriale herfra er meget lille. For resten af landet er en vurdering af reservoirparametrene forbundet med betydelig usikkerhed på grund af de spredte boredata.

På det foreliggende grundlag skønnes, at Gassum

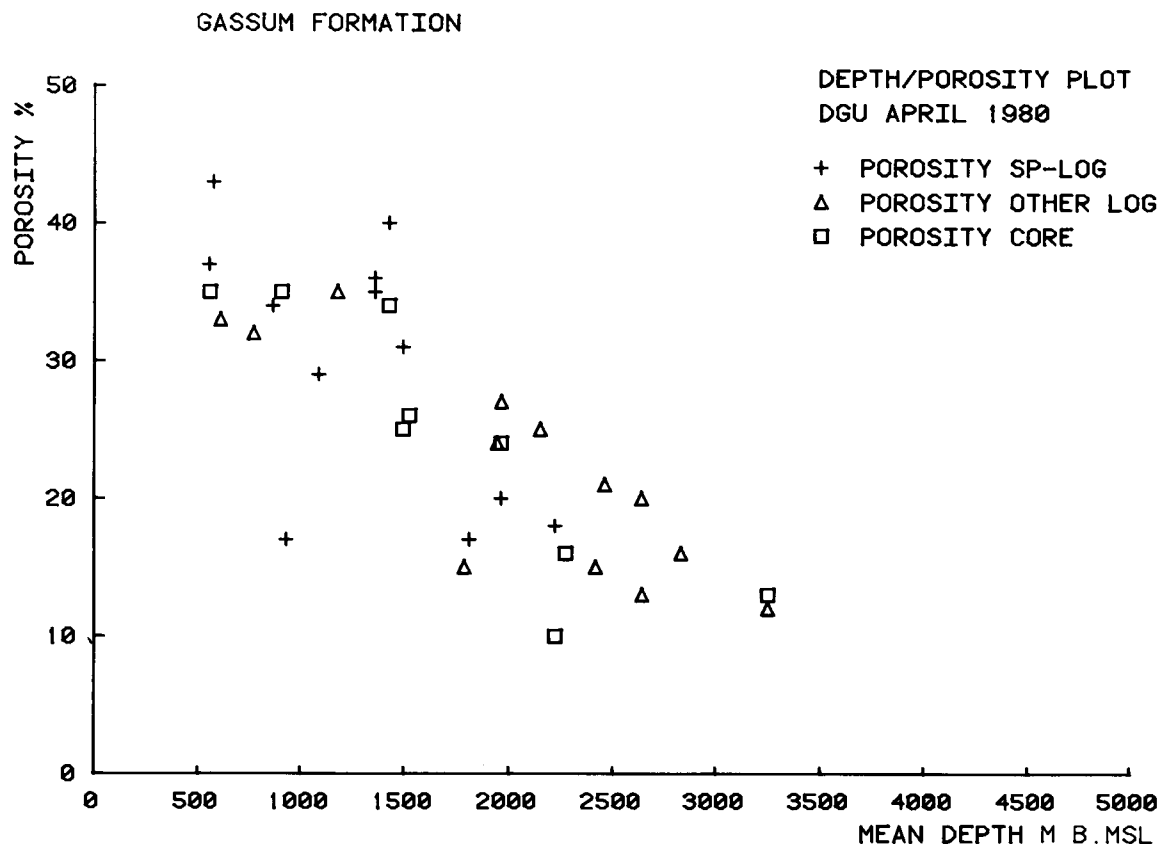


Fig. 20. Porøsitetsværdier for Gassum Formation plottet mod dybden. Det ses, at porøsiteten generelt aftager med dybden. Hvert punkt repræsenterer en boring. Værdierne stammer fra tabellen i appendix 1.

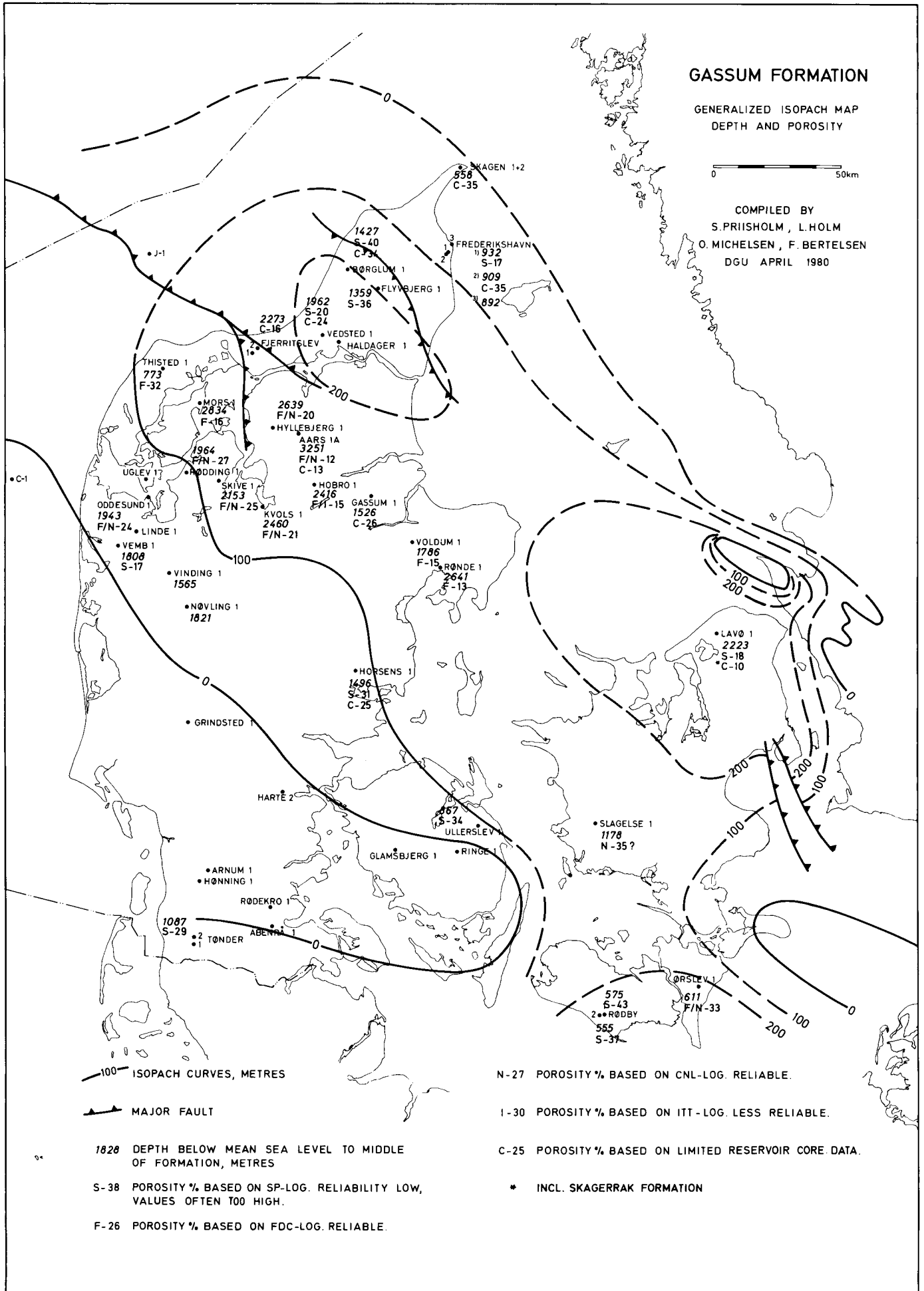


Fig. 21. Gassum Formationen. Generaliseret tykkelse, dybde og porøsitet.

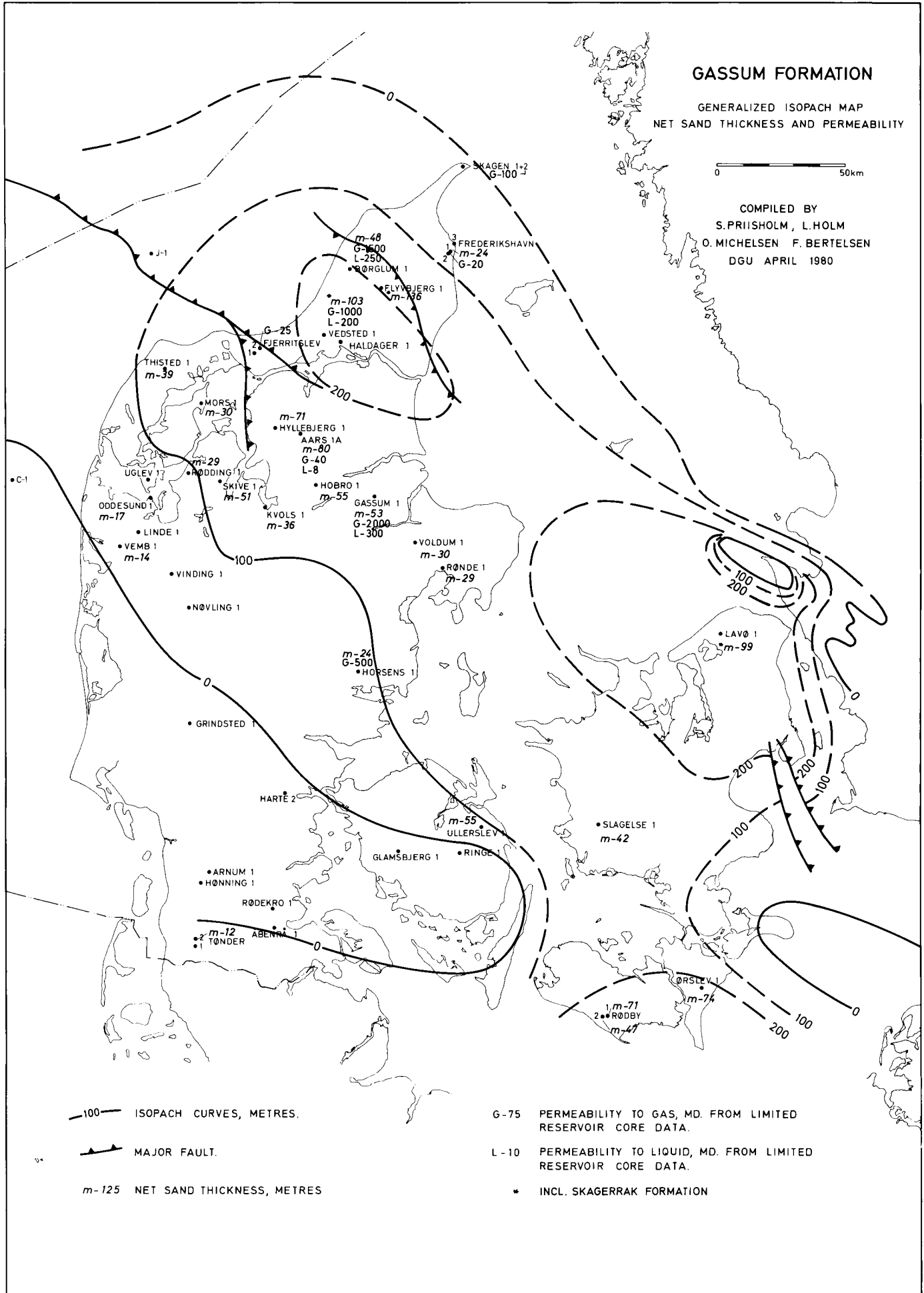


Fig. 22. Gassum Formationen. Generaliseret tykkelse, net sand tykkelse og permeabilitet.

Near Top Triassic
Isotherms Model A
Contour Interval 10°C

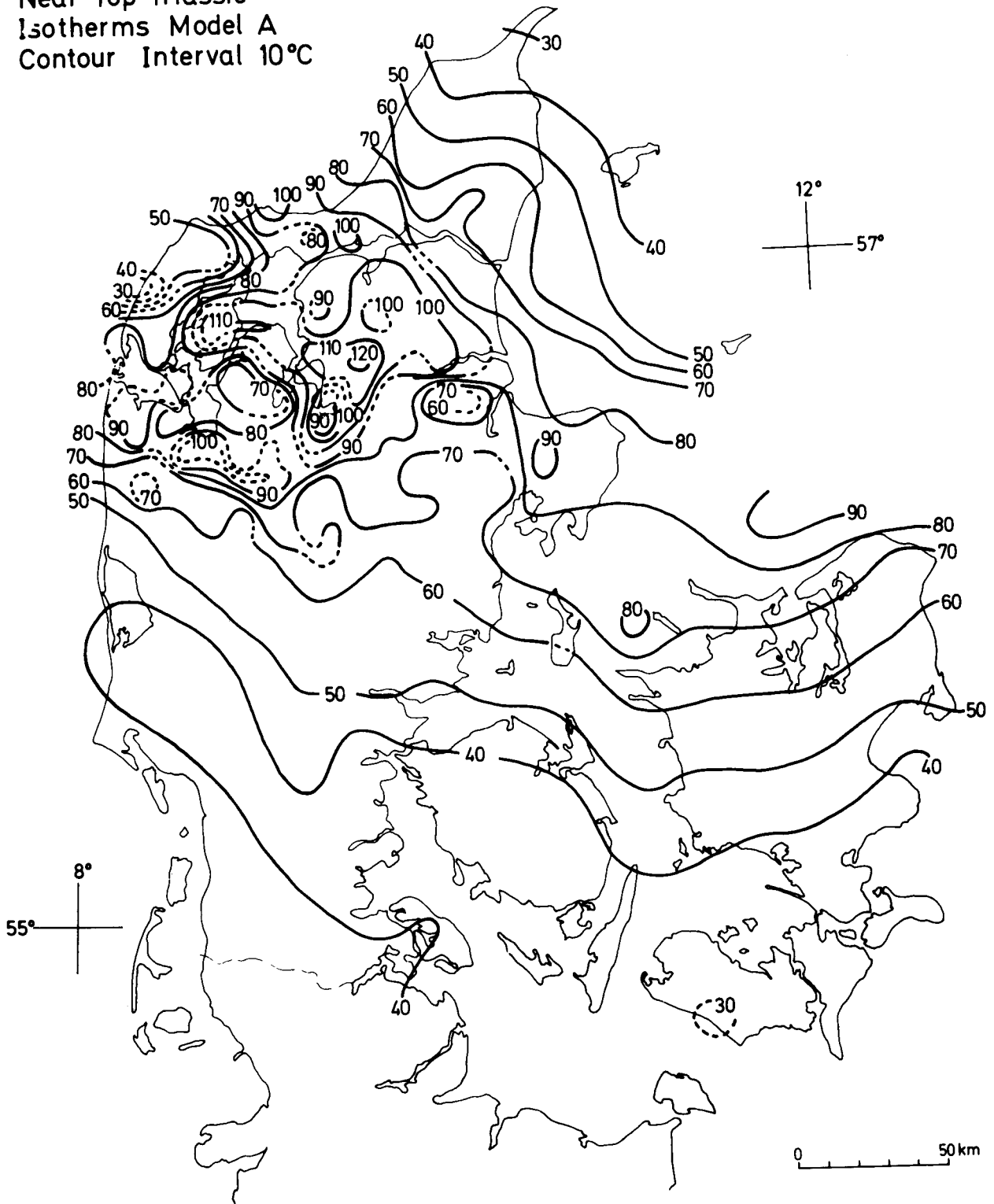


Fig. 24. Isothermer for top trias. Model A.

Near Top Triassic
Isotherms Model B
Contour Interval 10°C

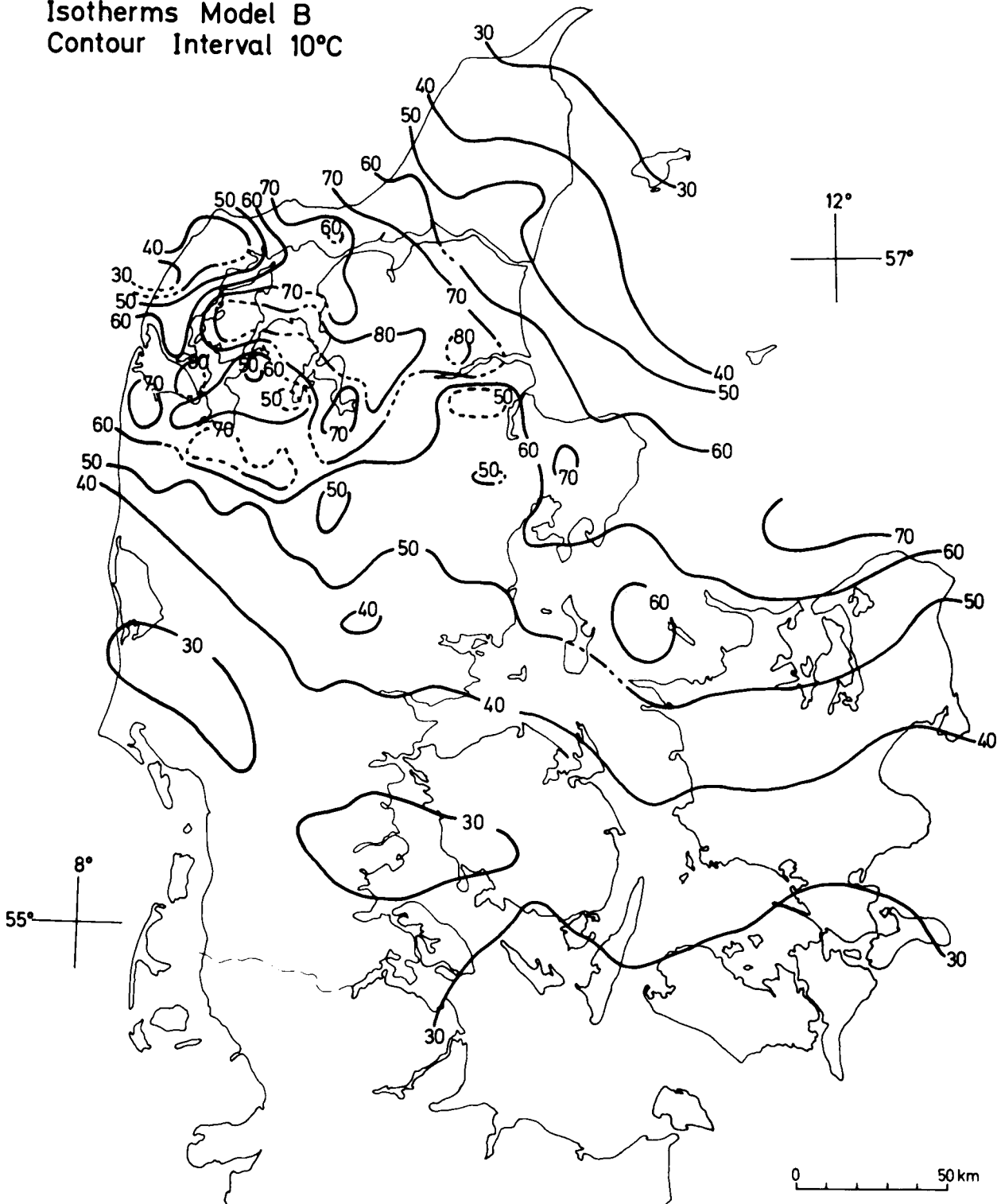


Fig. 25. Isothermer for top trias. Model B.

Near Top Triassic
Isotherms Model C
Contour Interval 20°C

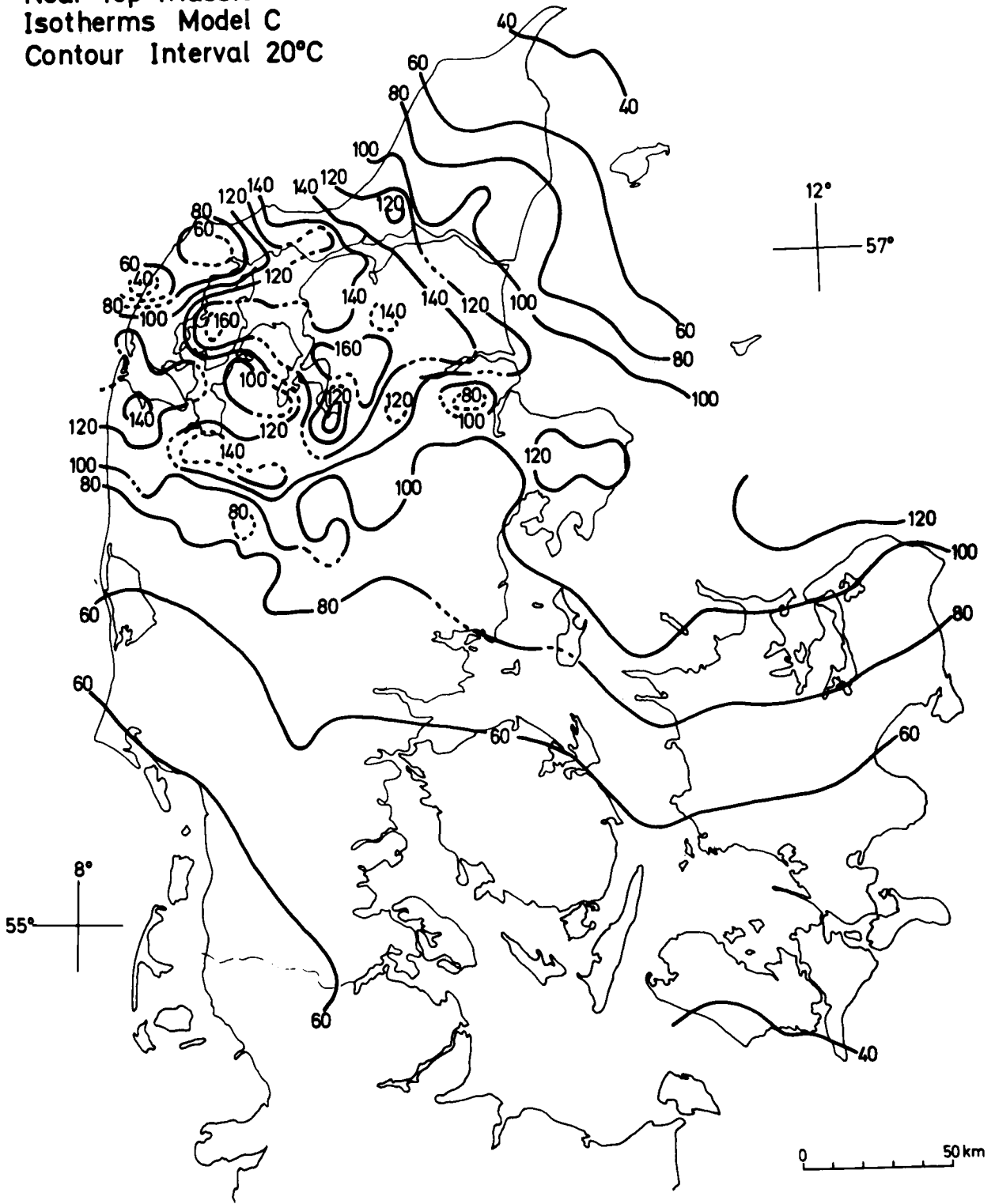


Fig. 26. Isothermer for top trias. Model C.

Formationen i det nordjyske område har gode geotermiske reservoirkarakterer, samt at den i Nordsjælland udgør et potentielt geotermisk reservoir.

Jura-nedre kridt

Haldager Sand

Fig. 27–33. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Haldager Formation, Haldager Sand (Michelsen 1978).

Geologisk alder: Mellem jura.

Lithologi: Lys olivengrå, fin- til mellemkornet sandsten og siltsten, der kan indeholde glimmer, planterester og kul. Imellem sandstenslagene findes tynde lag af grå til sort, sandholdig lersten. I den sydvestlige del af aflejningsområdet, bassincentralt, hvor lagserien er tynd varierer lithologien fra velsorterede sandlag til dårligt sorterede, lerede og sandede siltstenslag.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Haldager Sand findes i størstedelen af Det danske Subbassin. Lagserien har maksimal tykkelse, ca. 150 meter, i den sydøstli-

ge del af Vendsyssel og nordøstlige del af Himmerland. Mægtigheder på 25–50 meter forekommer i den centrale og nordøstlige del af Det danske Subbassin, medens lagserien er under 10 meter i den sydlige og sydvestlige del af bassinet. Anselige mægtigheder forekommer lokalt i randsynklinaler omkring saltstrukturer, f.eks. syd for Linde-Vejrum og omkring Tostrup.

I Vendsyssel, i den østlige del af Himmerland og mod Ringkøbing-Fyn Højderyggen, ligger Haldager Sand i dybden 1000–2000 m. I Det danske Subbassins centrale dele er dybden 2000–3000 meter og i enkelte områder endnu dybere. De lokale randsynklinalflejringer kan være dybtliggende, over 2500 meter.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten aftager generelt med dybden. Der er dog en stor spredning i porositetsværdierne i intervallet 0–1500 m. Fra 1500 m til 2500 m aftager porøsiteten fra ca. 30% til ca. 20%. Der findes kun luftpermeabilitetsmålinger fra 3 boringer. Disse varierer fra 2000 mD ved porøsitet på 33% til 500 mD ved 21% porøsitet.

Temperatur: Model A isotermerne (fig. 31) vurderes at give et godt grundlag for en regional vurdering. I den nordligste del af Jylland, hvor måleinfor-

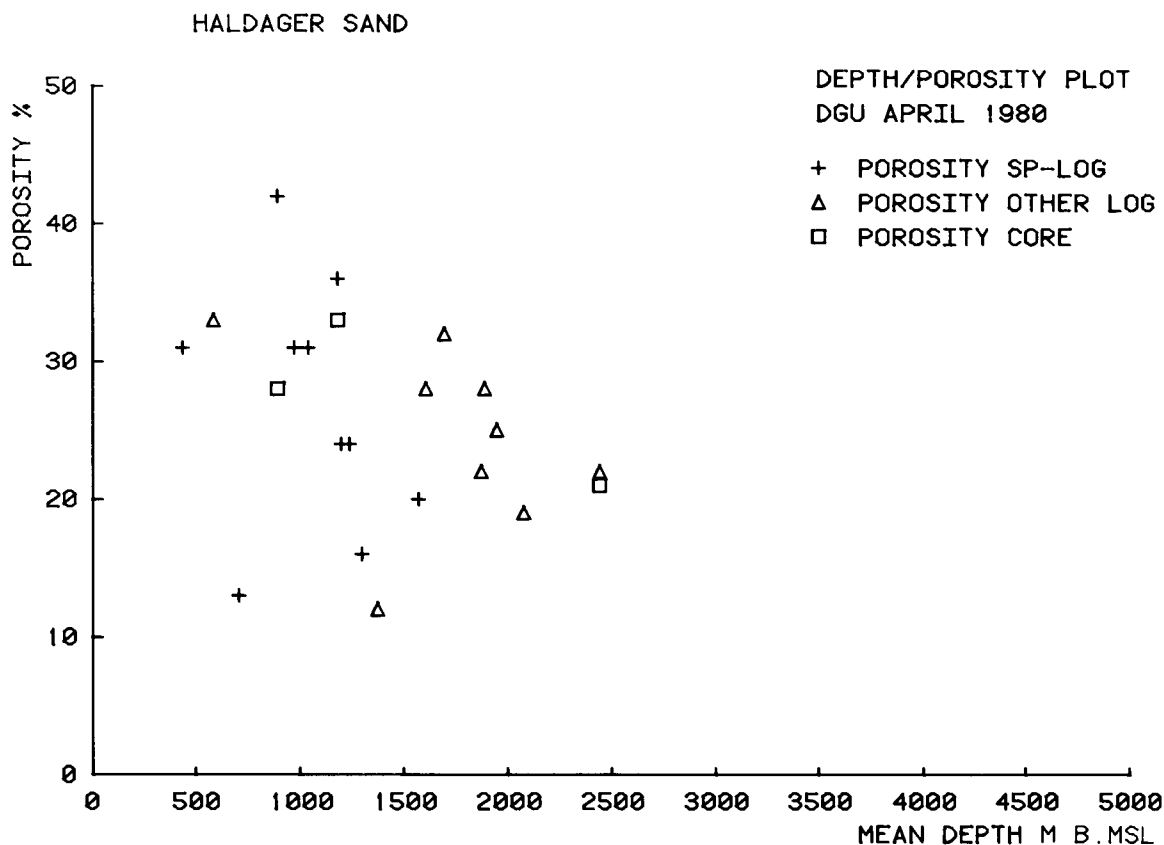


Fig. 27. Porositetsværdier for Haldager Sand plottet mod dybden. Det ses, at porøsiteten generelt aftager med dybden. Hvert punkt repræsenterer en boring. Værdierne stammer fra tabellen i appendix 1.

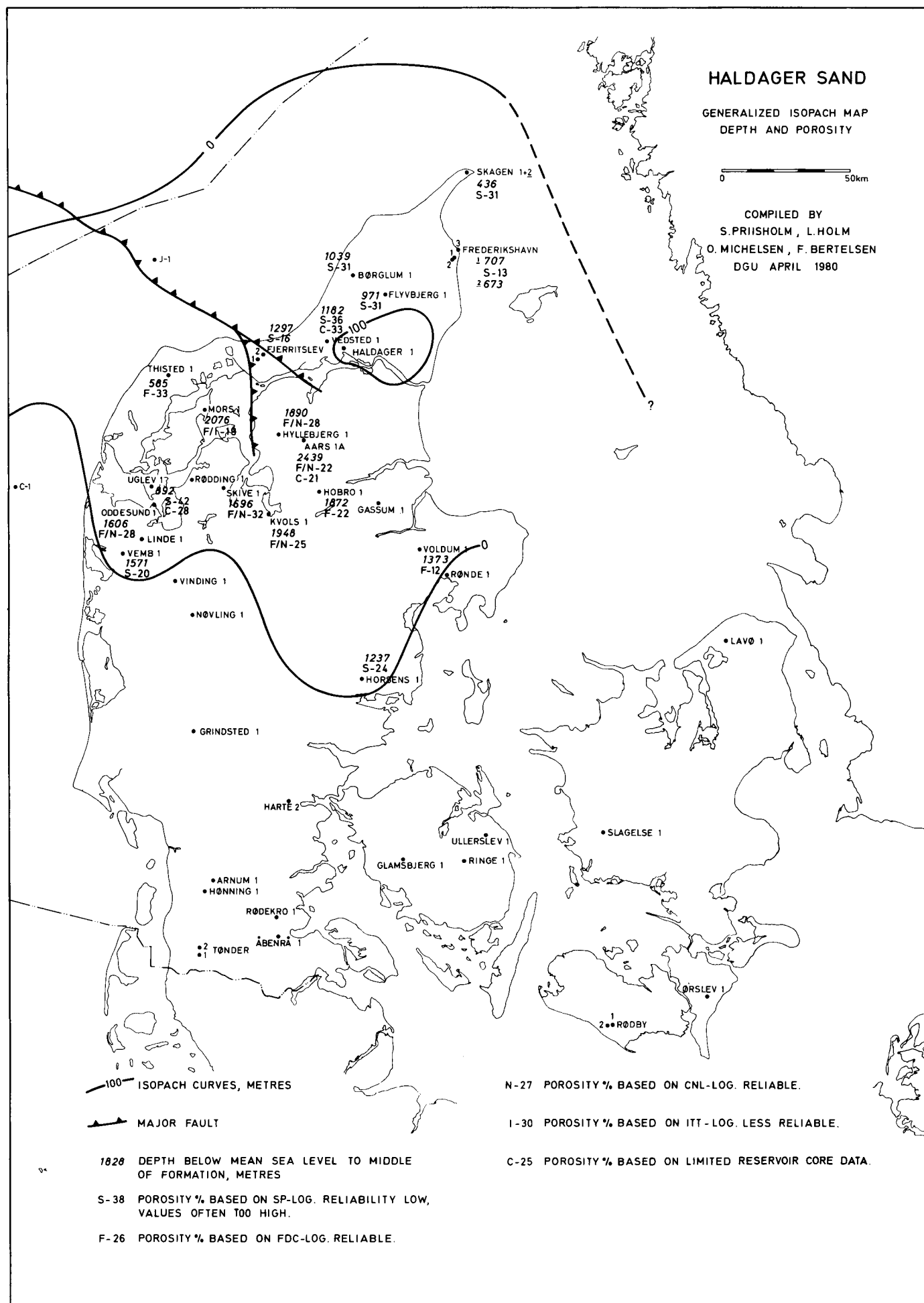


Fig. 28. Haldager Sand. Generaliseret tykkelse, dybde og porøsitet.

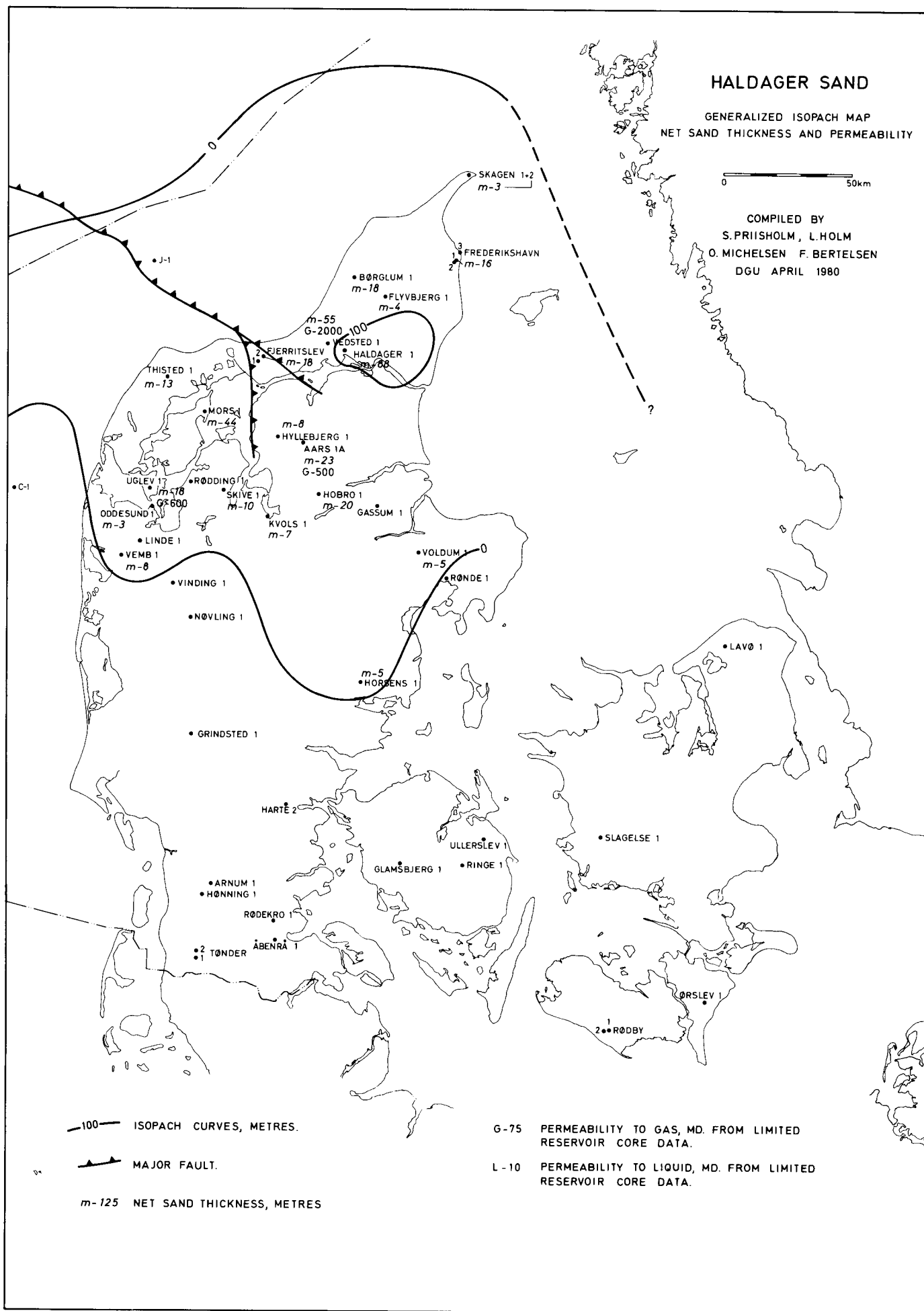


Fig. 29. Haldager Sand. Generaliseret tykkelse, net sand tykkelse og permeabilitet.

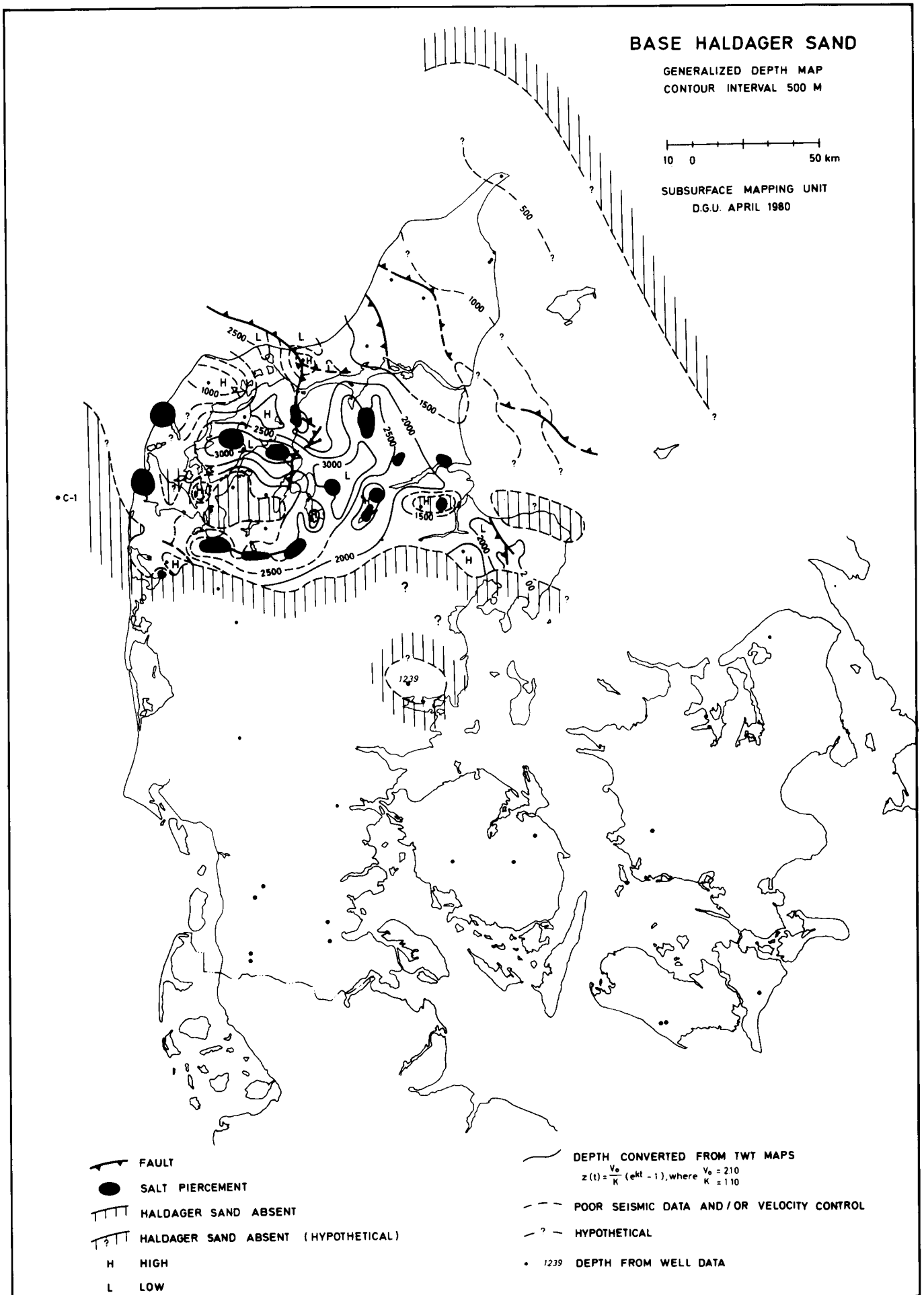


Fig. 30. Generaliseret dybdekort til basis af Haldager Sand.

Base Haldager Sand
Isotherms Model A
Contour Interval 10°C



Fig. 31. Isothermer for basis af Haldager Sand. Model A.

Base Haldager Sand
Isotherms Model B
Contour Interval 10°C



Fig. 32. Isothermer for basis af Haldager Sand. Model B.

Base Haldager Sand
Isotherms Model C
Contour Interval 20°C



Fig. 33. Isothermer for basis af Haldager Sand. Model C.

mationen er ringe, kan selv for større områder model B- og evt. C-temperaturer forekomme (fig. 32 og 33). Den typiske reservoirtemperatur i Nordjylland vurderes at ligge mellem 60 og 80°C. De generelt højeste temperaturer skønnes at være ca. 80–100°C i Himmerland. Ved konstant dybde og konstant geotermisk flux vil de højeste værdier forekomme, hvor formationen er overlejret af en forholdsvis tynd kalkstensserie og tilsvarende mægtig nedre kridt-øvre jura serie.

Sammenfattende bemærkninger: Haldager Sand forventes at have rimeligt gode reservoirkarakterer, ligge i tilpas dybde og dermed have geotermiske muligheder i et bælte midt ned gennem Himmerland, i den nordlige del af Mors samt i lokale randsynklinaler omkring saltstrukturer. I ovennævnte områder findes kun enkelte borer, hvorfor sandlagets tykkelse og karakter er vanskelig at bedømme. Seismiske tolkninger af randsynklinaldannelserne tyder på væsentlige sandmægtigheder, hvorfor disse områder kan være lovende.

Frederikshavn Member

Fig. 34–36. Appendix 1.

Lithostratigrafisk inddeling: Bream Formation, Frederikshavn Member (Michelsen 1978).

Geologisk alder: Øvre jura – nedre kridt; kimmeridgien-berriasien.

Lithologi: Siltsten og finkornet sandsten, der veksler med siltholdig lersten. Sandstenen kan være lerholdig, ligesom glimmer, pyrit, mikrolignit og glaukonit forekommer.

Silt-sandindholdet i lerstenen tiltager mod nordøst ligesom mægtigheden og hyppigheden af sandlag tiltager i denne retning.

Udbredelse, tykkelse og dybde: Frederikshavn Member er begrænset til Jylland, nord for Ringkøbing-Fyn Højderyggen.

Lagserien har en tykkelse på 50–150 meter med maksimum på 250 meter i Han Herred. Net sand tykkelsen varierer i Himmerland fra 5–35 meter sti-

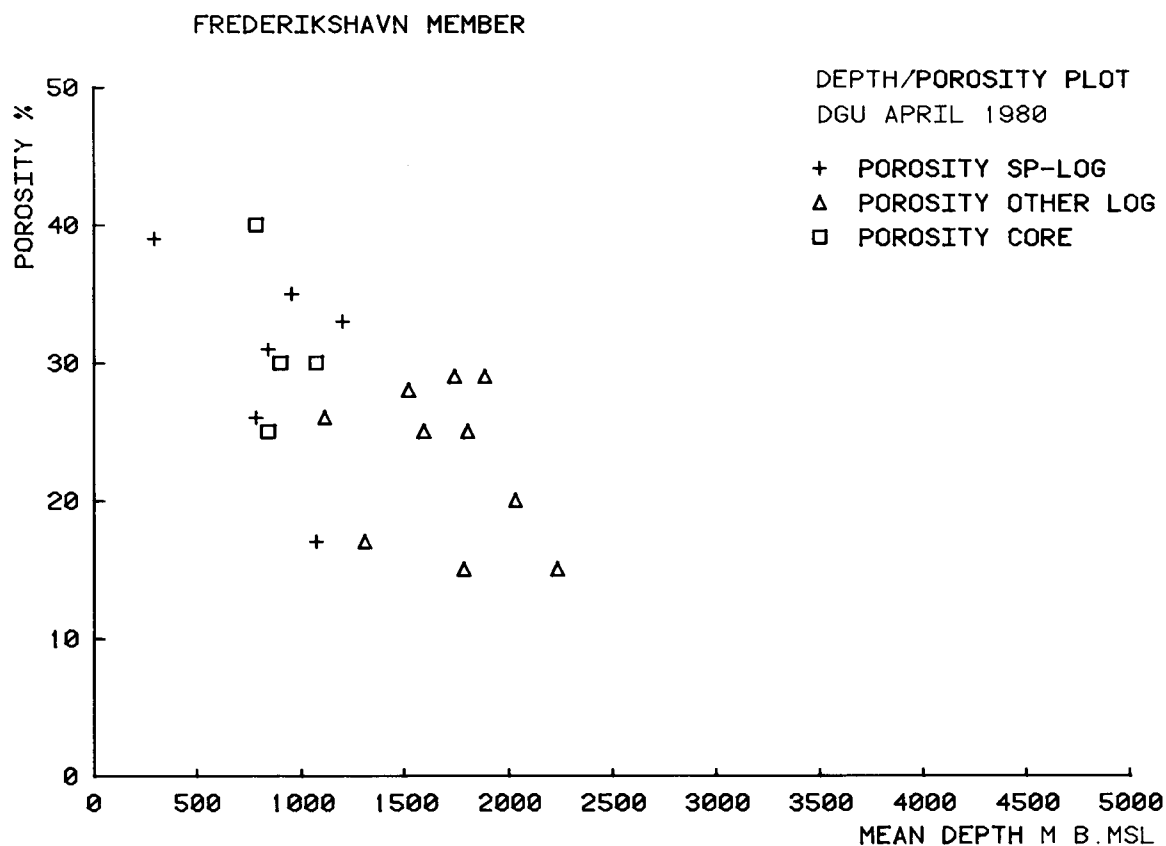


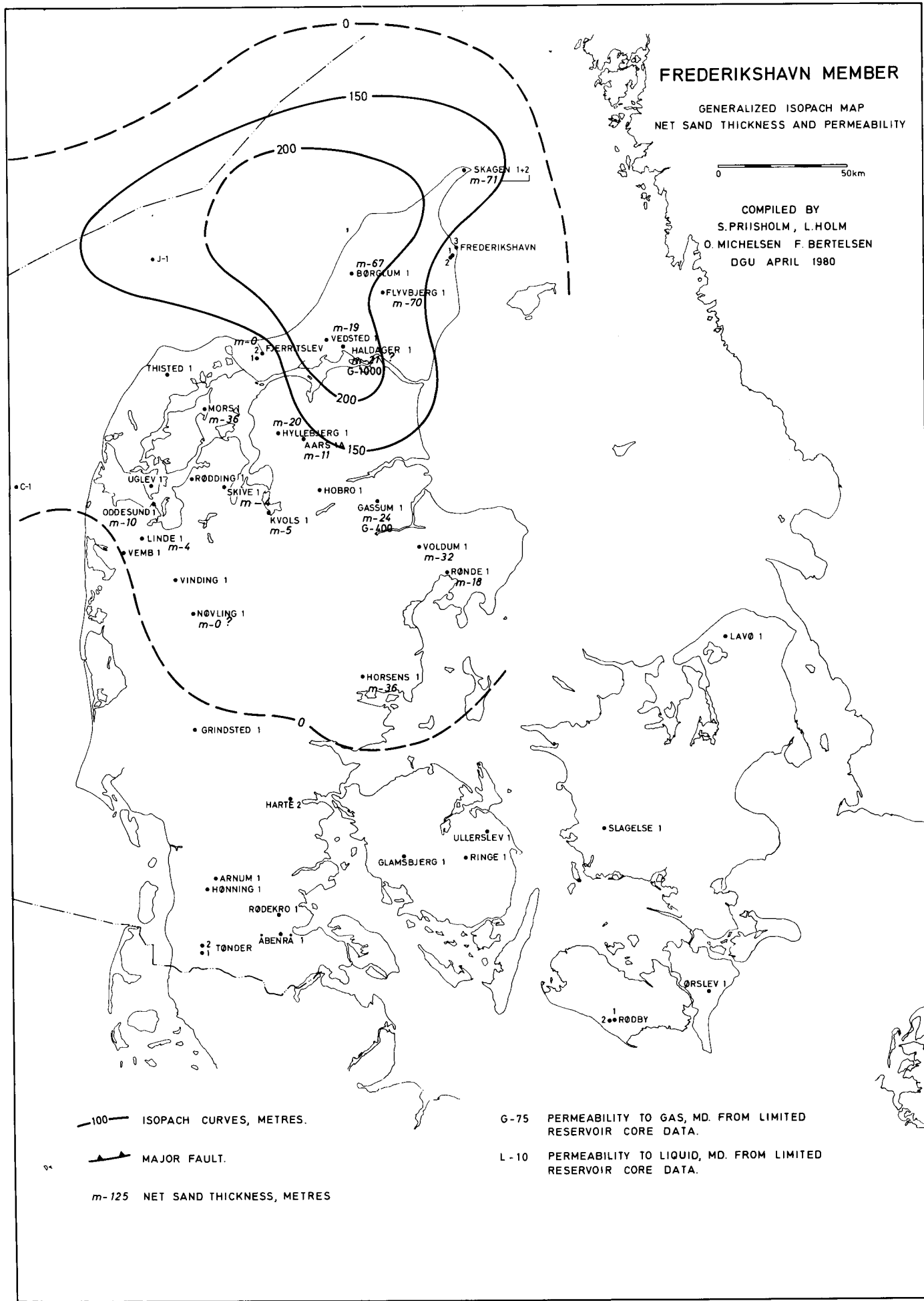
Fig. 34. Porositetsværdier for Frederikshavn Member plottet mod dybden. Det ses, at porositeten generelt aftager med dybden. Hvert punkt repræsenterer en boring. Værdierne stammer fra tabellen i appendix 1.

FREDERIKSHAVN MEMBER

GENERALIZED ISOPACH MAP
NET SAND THICKNESS AND PERMEABILITY

0 50km

COMPILED BY
S. PRIISHOLM, L. HOLM
O. MICHELSEN F. BERTELSEN
DGU APRIL 1980



100 ISOPACH CURVES, METRES.

MAJOR FAULT.

m-125 NET SAND THICKNESS, METRES

G-75 PERMEABILITY TO GAS, MD. FROM LIMITED RESERVOIR CORE DATA.

L-10 PERMEABILITY TO LIQUID, MD. FROM LIMITED RESERVOIR CORE DATA.

Fig. 36. Frederikshavn Member. Generaliseret tykkelse, net sand tykkelse og permeabilitet.

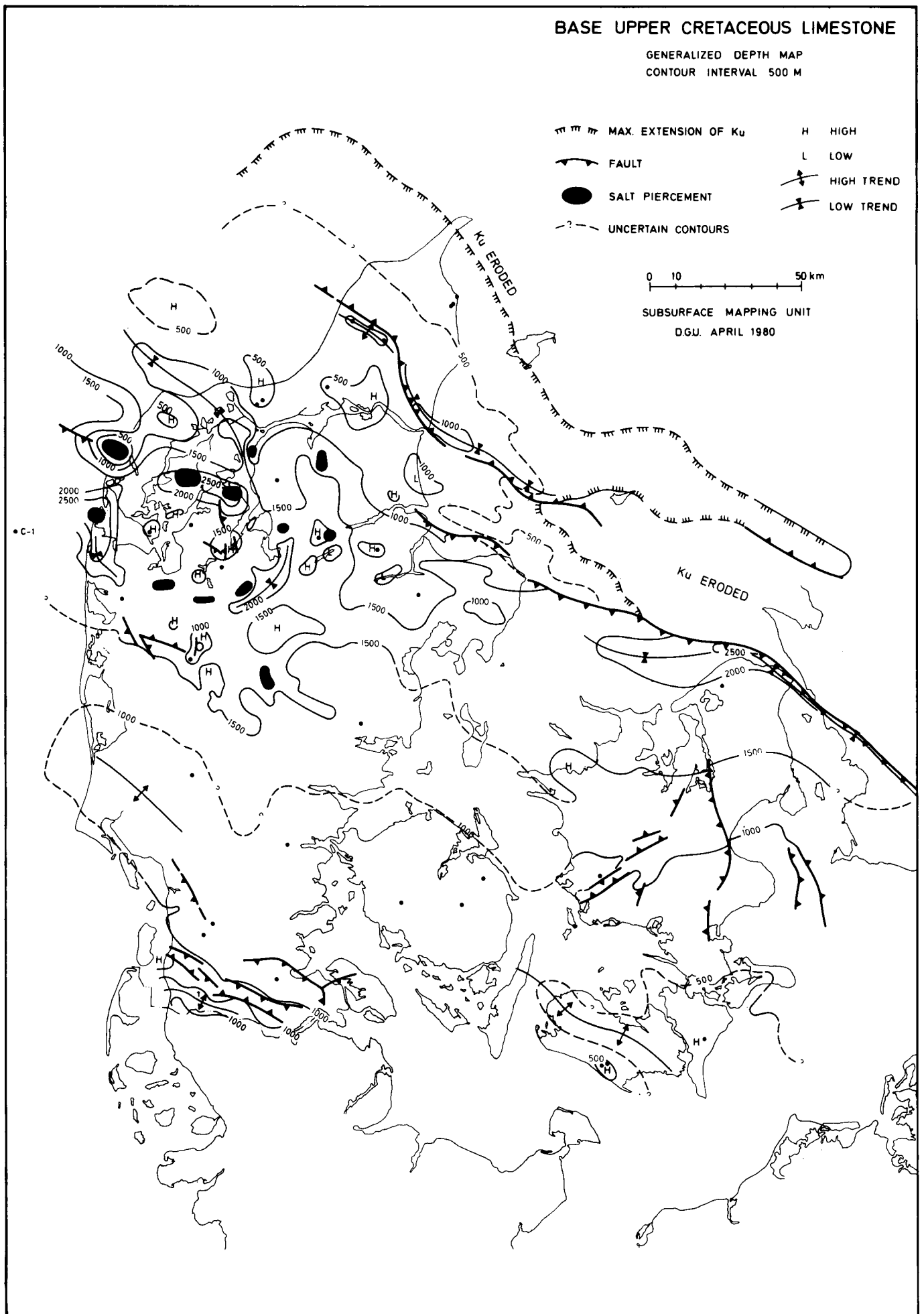


Fig. 37. Generaliseret dybdekort til basis af øvre kridt kalksten.

Base Upper Cretaceous Limestone
Isotherms Model A
Contour Interval 10°C

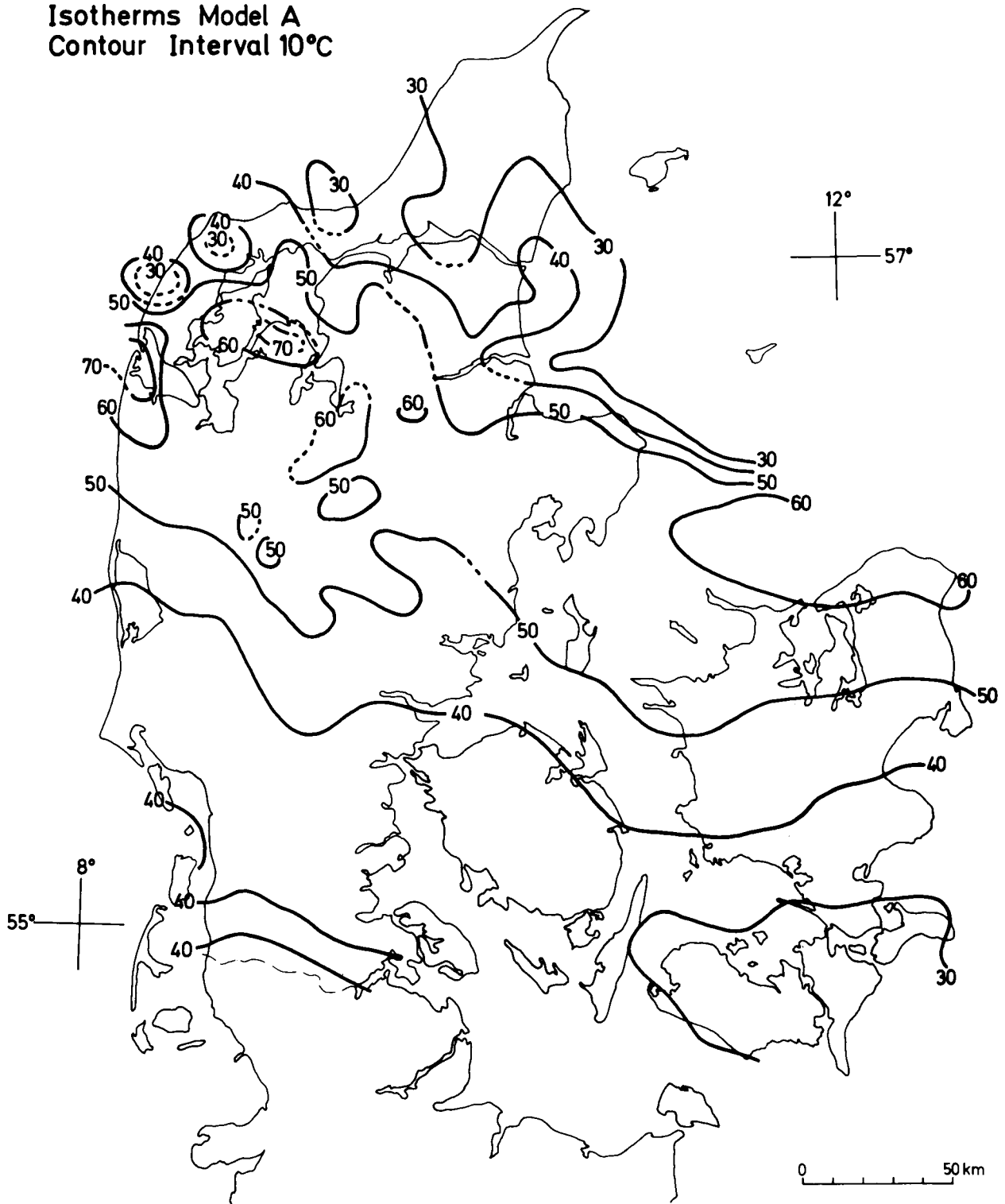


Fig. 38. Isothermer for basis af øvre kridt kalksten. Model A.

Base Upper Cretaceous Limestone
Isotherms Model B
Contour Interval 10°C

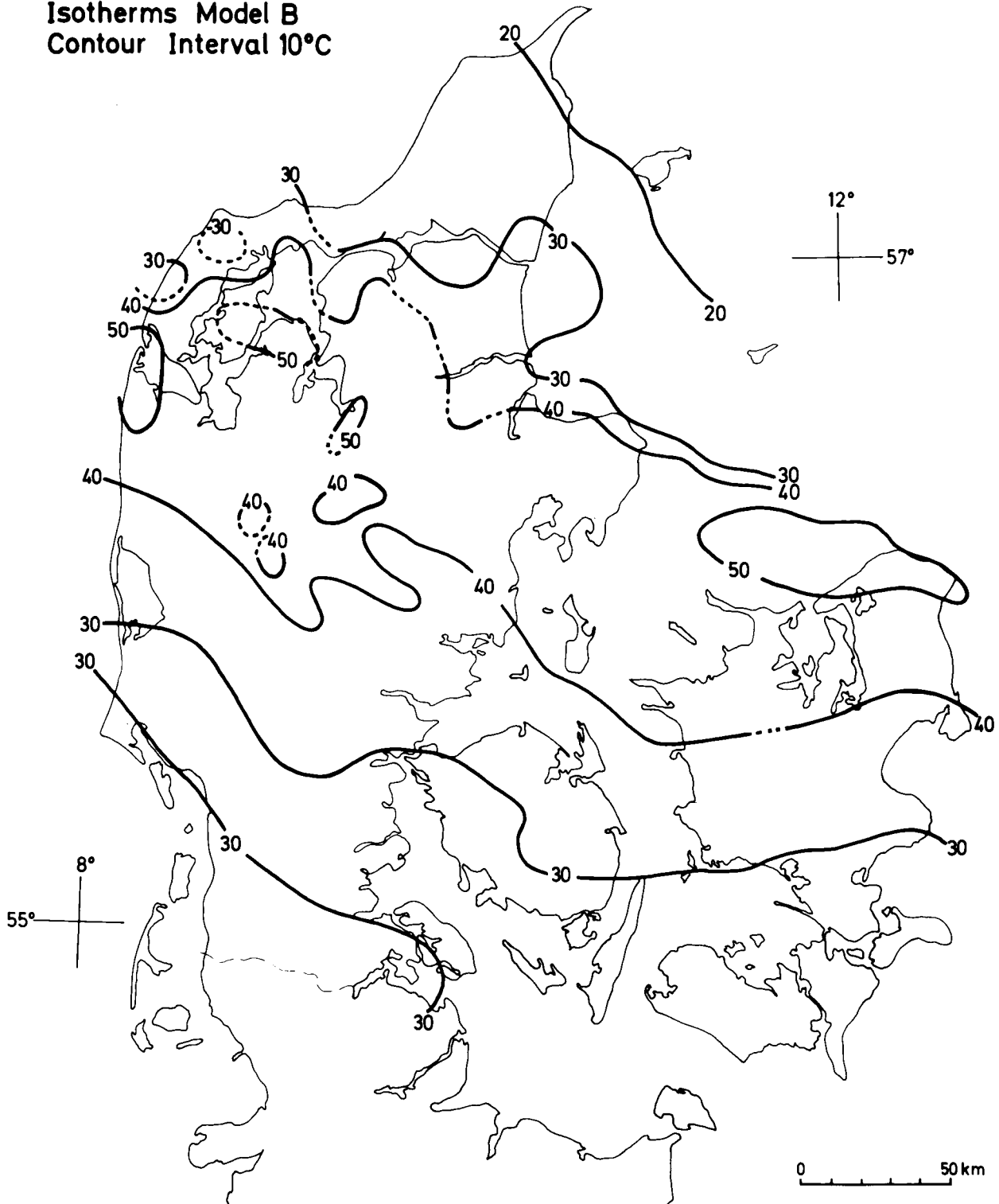


Fig. 39. Isothermer for basis af øvre kridt kalksten. Model B.

Base Upper Cretaceous Limestone
Isotherms Model C
Contour Interval 10°C

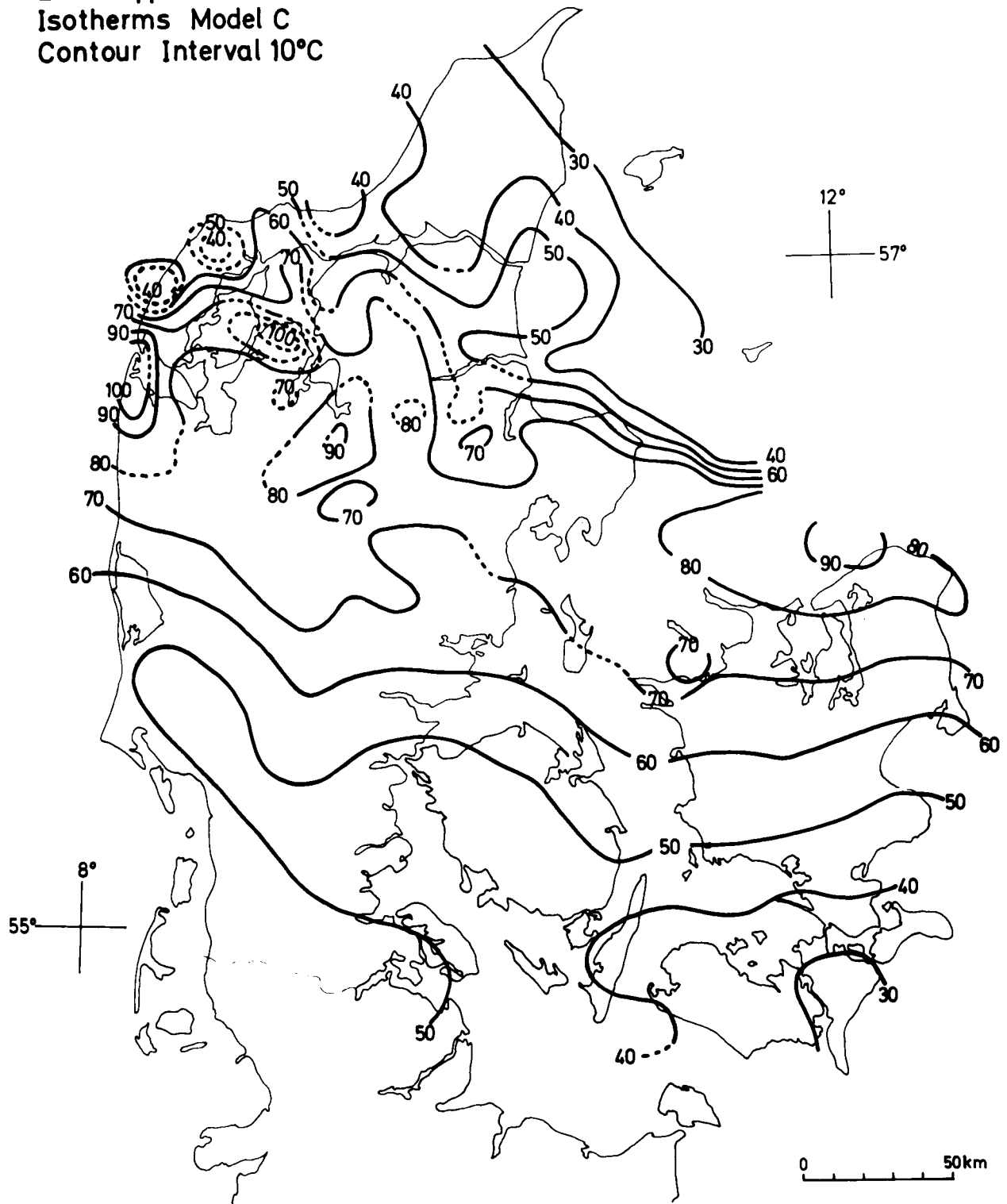


Fig. 40. Isothermer for basis af øvre kridt kalksten. Model C.

gende til 70 meter i Vendsyssel. Den varierende tykkelse i Himmerland skyldes lokale ændringer i aflejringssmiljøet, delvis forårsaget af tektoniske forstyrrelser. Dybden til top af Frederikshavn Memberet er cirka 1000 meter. Maksimal dybde på lidt over 2000 meter findes centralt i Det danske Subbassin, medens dybden aftager i Vendsyssel med minimumsdybde på 200 meter ved Skagen.

Porøsitet og permeabilitet: Porøsiteten er relativ god, 25–35%, i 1000 meters dybde, aftagende til 15–20% i 2000 meter. Det varierende indhold af glaukonit, glimmer og ler nedsætter dog porøsiteten væsentligt i nogle områder.

Permeabiliteten antages at være 500–1000 mD i områder med 25–35% porøsitet. Glimmer- og lerindhold vil nedsætte permeabiliteten.

Temperatur: Frederikshavn Memberets temperatur kan i de områder, hvor lagserien findes, med god tilnærmelse aflæses på model A-isotermerne for basis af øvre kridt kalksten (fig. 38). Der er størst usikkerhed for områderne i det nordligste Jylland, hvor temperaturer svarende til model B og C (fig. 39 og 40) kan forekomme. I de dybere dele af Subbassinet vurderes temperaturen typisk at være 50–60°C, lokalt omkring 70°C, aftagende til 35–45°C, hvor formationen findes i dybder omkring 1000 m.

Sammenfattende bemærkninger: Frederikshavn Memberets porøsitet og permeabilitet vurderes som god i dybder mindre end 1000 meter. Under denne dybde aftager værdierne, og samtidig er aflejringstypen her, i Himmerland, karakteriseret ved spredte, tynde sandstenslag af begrænset udbredelse, hvorfor memberets værdi i geotermisk sammenhæng er begrænset.

Hydrokemi

I Danmark er der udført ca. 50 dybdeboringer på land, de fleste af disse er beliggende i Nordjylland. Boringerne er for størsteparten udført med olieeffterforskning for øje, men en del er udført med henblik på at finde kaliforekomster i udnyttelige mængder.

Da der ikke blev fundet olie og gas af økonomisk betydning var der ingen interesse for at foretage prøvepumpninger (drill stem tests) af de forskellige reservoirer. Ved to Suldrup-boringer indsamledes og analyseredes vandprøver i forbindelse med artesiske udbrud, da boret nåede lag af hovedsagelig gibs og dolomit i salthorsten. Også ved Tønder 1 boringen

oplevede man et artesiske udbrud af saltvand, da boret nåede et anhydritlag i zechstein.

Som sagt er drill stem tests kun udført i nogle af olieeffterforskningsboringerne, og kemianalyser af det oppumpede saltvand foreligger kun fra en del af disse drill stem tests. Ikke alle af de foreliggende kemianalyser er medtaget, da det oppumpede vand skønnedes at være kraftigt forurennet med boremudder.

Kemianalyserne kan groft opdeles i 2 grupper, den ene repræsenterer formationsvand fra zechstein lagene, den anden formationsvand fra de forskellige sandstensformationer. Geotermisk vand vil sandsynligvis ligge tættest ved sidstnævnte gruppe. Formationsvand fra de forskellige sandstensformationer viser en øget saltholdighed med stigende dybde.

Som en tommelfingerregel øges formationsvandets saltholdighed med dybden på følgende måde: 1000 m ~ 10% salinitet, 2000 m ~ 20% salinitet og 3000 m ~ 30% salinitet.

En tilsvarende relation til dybde kan dog ikke forventes for formationsvand fra zechstein lagene.

En generel viden om det geotermiske vands saltholdighed er imidlertid utilstrækkelig til at bedømme omfanget og arten af korrosion og scaling. Til det formål er det nødvendigt at have et præcist kendskab til formationsvandets surhed, og indhold af opløste ioner og gasser.

Regional reservoirkarakteristik

På grundlag af ovenstående reservoirbeskrivelser, samt den seismiske kortlægning og analyse af data-dækning og -kvalitet kan Danmark opdeles i seks områder med hver sin karakteristik med hensyn til geotermiske reservoirregenskaber. Som ramme for inddelingen benyttes dybdeintervallet 2000 til 3000 m, idet temperaturen kan være for lav over 2000 m, og diagenesen (hærdningen) kan være for fremskreden under 3000 m. Uanset alle formationer ikke har en mineralogisk sammensætning, der bevirker diagenetiske ændringer af samme grad under samme vilkår, og uanset disse faktors indflydelse endnu ikke er grundigt undersøgt, er 3000 m her brugt som en nedre grænse for vurderingen.

Til brug for denne sammenfattende konklusion er der fra bl.a. dybdekortene uddraget hvilke formationer, der forekommer i dette dybdeinterval. Disse er i generaliseret form indtegnet på kortet fig. 41. Sammenholdt med analyserne af reservoirregenskaberne er der på kortet fig. 43 foretaget en opdeling og en

klassifikation i seks områder. Denne klassificering sigter på at give et samlet indtryk af hvilke geologiske lag (formationer), der eventuelt kan udnyttes i de forskellige dele af landet, og af hvilken form og grad af undersøgelser, der er nødvendig for kommende efterforskning af geotermisk energi.

Model A isotermerne for 2000 og 3000 m fremgår af fig. 42 og 44. For områder hvor basis af trias ligger over disse niveauer er der beregningsmæssigt for de ældre formationer anvendt samme termiske parametre som for trias lagene (lag 7, tabel 2). I de centrale dele af Det danske Subbassin er der regionalt fundet overensstemmelse inden for $\pm 5-10^{\circ}\text{C}$ mellem disse modelværdier og målte temperaturer. Uden for dette område og lokalt inden for området må temperaturen svarende til model B og evt. C medtages i vurderingen (se teksten til fig. 42 og 44).

Område A er udskilt som det område, hvor Gassum Formationen vil være hovedobjektet. Haldager Sand ligger dog i begrænsede dele også inden for det omtalte dybdeinterval. Mod syd i Jylland er afgrænsningen lagt, hvor formationens net sand tykkelse er mindre end 50 m, og mod nordøst hvor formationen menes at overlejre Skagerrak Formationen direkte. På Sjælland er dybdekonturerne fulgt.

Jylland: Som det fremgår af tekst og tabeller forventes Gassum Formationens reservoirkarakterer at være af varierende værdi, men generelt set gode. Den nordøstlige del af Område A menes at have de bedste reservoirkarakterer. I en del af dette delområde ligger Haldager Sand tillige under 2000 m grænsen og kan som sådan udgøre et alternativt eller supplerende objekt.

Sjælland: Gassum Formationen er indenfor området kun kendt fra boringen Lavø 1, men grundet den regionale beliggenhed forventes der rimelig gode reservoirkarakterer.

Område B er udskilt som et område, hvor Skagerrak Formationen vil være hovedobjekt. Sydligst ligger tillige Gassum Formationen under 2000 m grænsen og overlejrer Skagerrak Formationen direkte. Aflejringeres reservoirkarakterer er meget dårligt kendte, idet kun to boringer har anført Skagerrak Formationen, mens de øvrige er standset i Gassum Formationen. Den seismiske dækning og kvalitet heraf udelukker en forsvarlig kortlægning.

Den regionale placering gør, at der må forventes forekomster af relativt tykke sandstenslag med varierende reservoirkarakterer alt efter aflejringsmiljø, – formodentlig bedst i den sydlige del af området.

Områdets nordlige grænse er muligvis valgt for langt mod nord, idet den noget usikre seismiske indikation af 2000 m dybdekonturen for top præ øvre perm er fulgt.

Område C er på kortet fig. 43 mærket med "B" eller "?T", idet sidstnævnte er udskilt som delområde. Område C omfatter de dele af landet, hvor ældre trias aflejringer, Tønder og Bunter Sandsten Formationerne, kan komme på tale som efterforskningsobjekt for geotermisk energi. Gassum Formationen ligger ikke dybt nok og/eller har for ringe reservoirkarakterer. Området omfatter en del af Sjælland, og i Jylland området mellem område A og Ringkøbing-Fyn Højderyggen, samt en del småområder, der grundet den komplicerede strukturelle opbygning findes indenfor område A.

Sjælland: Aflejringerne kendes kun fra den seismiske kortlægning, som er baseret på materiale af varierende kvalitet. Grundet den ringe afstand til Den fennoskandiske Randzone, hvor Bunter Sandsten er kendt (fra Skåne), er det berettiget at formode forekomst af rimelige gode reservoirkarakterer. Længst mod nord i området ligger Bunter Sandsten Formationen dybere end 3000 m, men baseret på analogislutninger fra bl.a. Slagelse boringen forventes sandlag ækvivalente med Tønder Formationen at forekomme, men med ukendt net sand tykkelse.

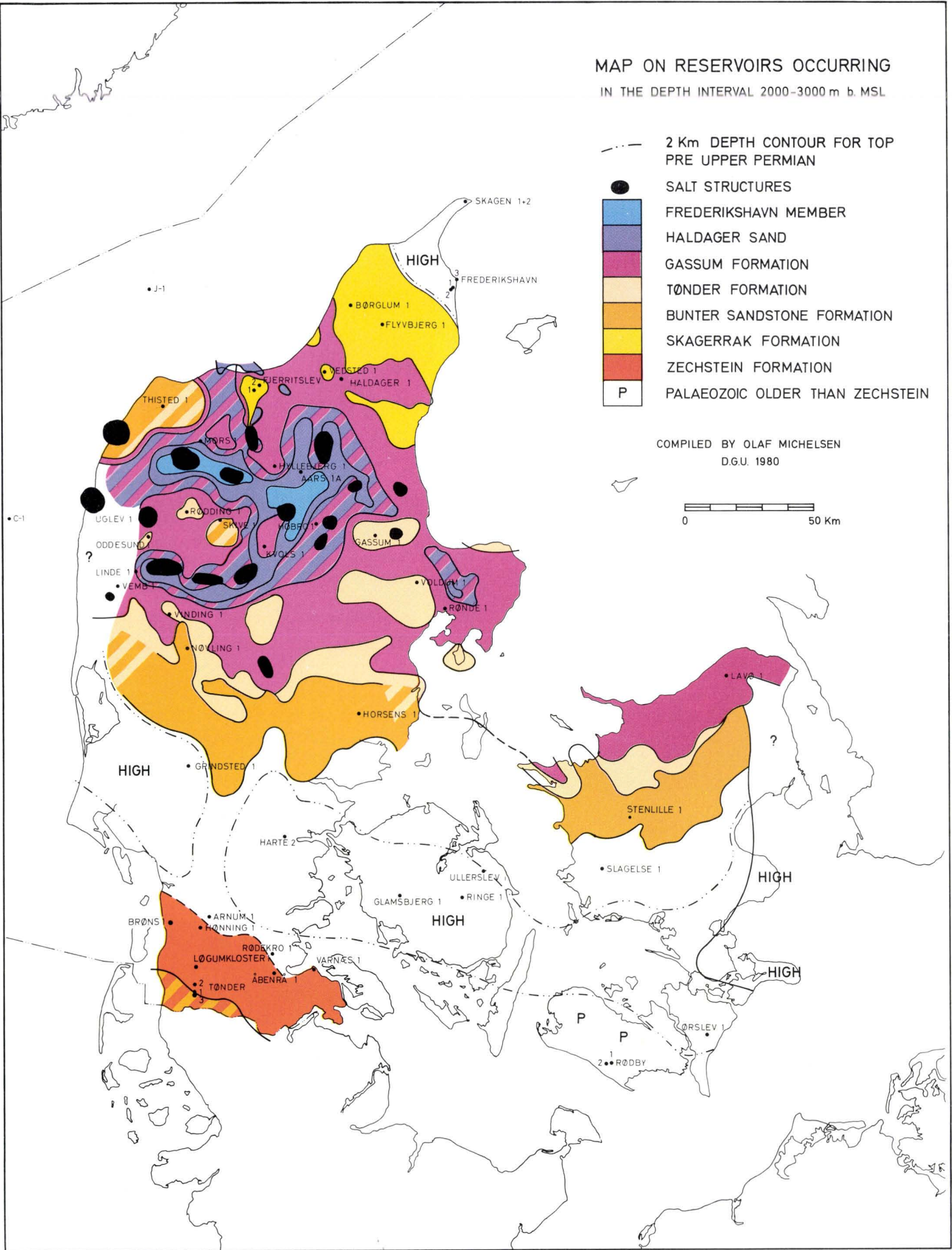
Jylland: I området syd for område A kendes ældre trias aflejringer kun fra boringerne Rønde 1 og Nøvling 1. Den seismiske dækning er forholdsvis ringe og kortlægningen kan kun foretages i begrænset omfang. Bunter Sandsten Formationen findes mod syd i det omtalte dybdeinterval, men dykker mod nord under 3000 m samtidig med at sandlagenes samlede tykkelse tiltager. Også kornstørrelsen forventes at tiltage. I den nordlige del af området, mærket med "?T", forventes Tønder Formationen at være et muligt efterforskningsobjekt.

De småområder inden for område A som på kortet er markeret som område C er primært karakteriseret ved at Gassum Formationen ikke ligger indenfor dybdeintervallet. Kendskabet til de ældre trias aflejringer i disse småområder er meget ringe og kan ikke kortlægges med nuværende seismiske materiale. Grundet den almindelige regionalgeologiske opfattelse vil Tønder Formationen og, i begrænsede områder, også Bunter Sandsten Formationen ligge i passende dybde og have rimelig gode reservoirkarakterer.

Såvel seismiske som geologiske undersøgelser af de to formationer i område "C" er påkrævet.

Fig. 41. Kort over reservoirformationer, der forekommer i dybdeintervallet 2000–3000 m.

MAP ON RESERVOIRS OCCURRING
IN THE DEPTH INTERVAL 2000-3000 m b. MSL



Depth: 2000m
Isotherms Model A
Contour Interval 10°C

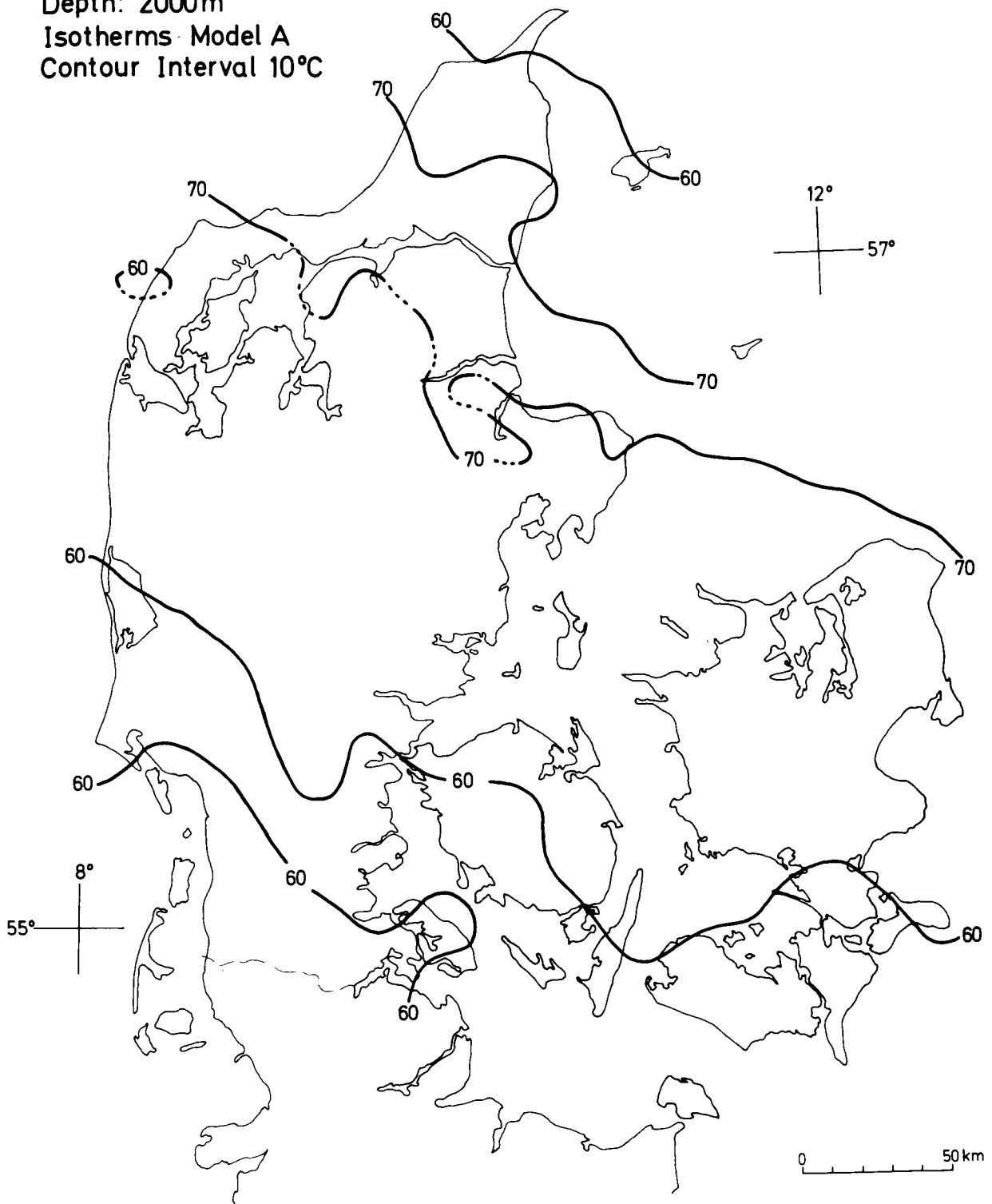
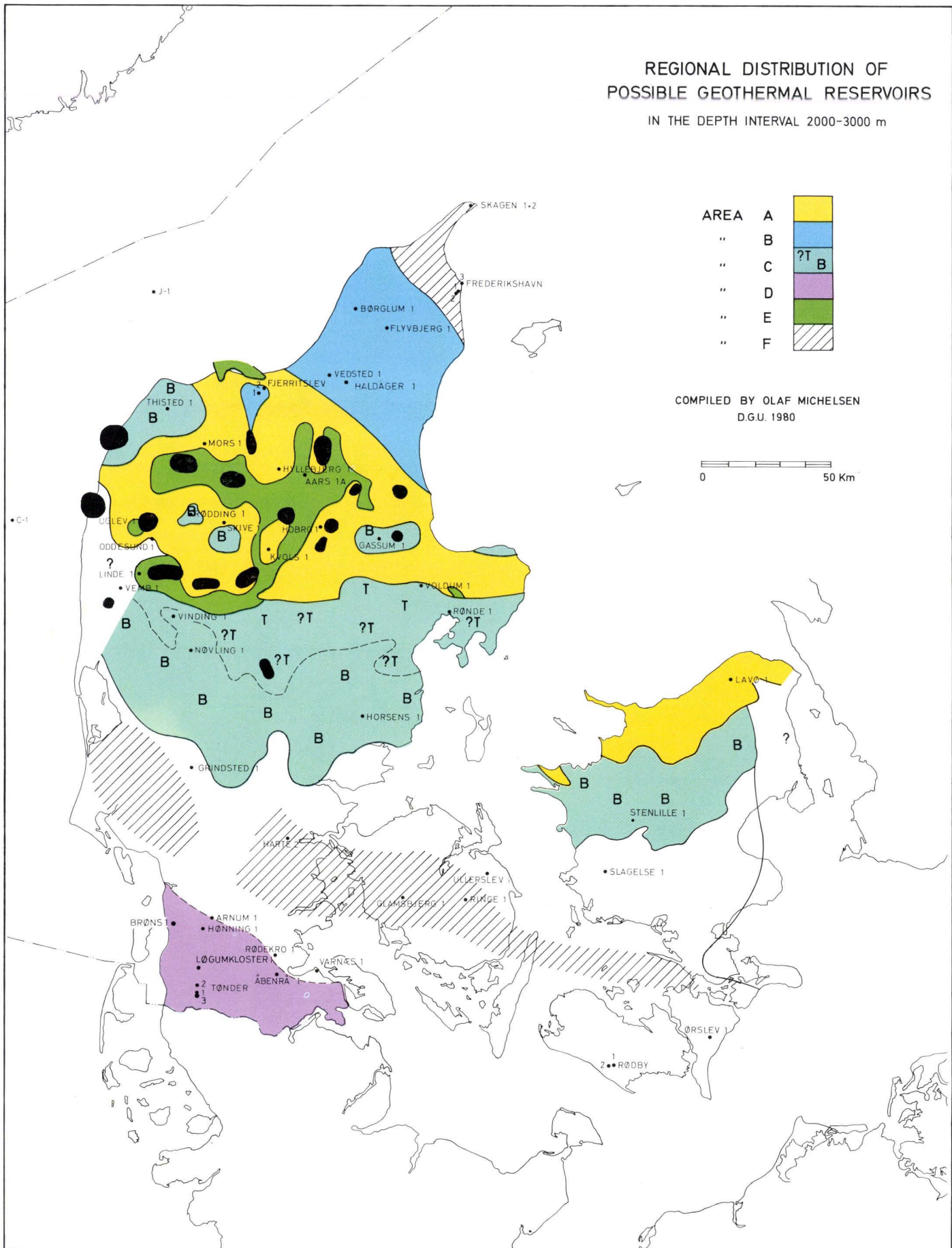


Fig. 42. Isothermer for 2000 m's dybde. Model A.

Fig. 43. Regional udbredelse af mulige geotermiske reservoirer i dybdeintervallet 2000–3000 m. (Side 63).

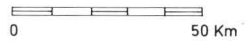
REGIONAL DISTRIBUTION OF POSSIBLE GEOTHERMAL RESERVOIRS

IN THE DEPTH INTERVAL 2000-3000 m



AREA	A	B	C	D	E	F
"			?T			
"			B			
"						
"						
"						
"						

COMPILED BY OLAF MICHELSEN
D.G.U. 1980



Depth: 3000m
Isotherms Model A
Contour Interval 10°C

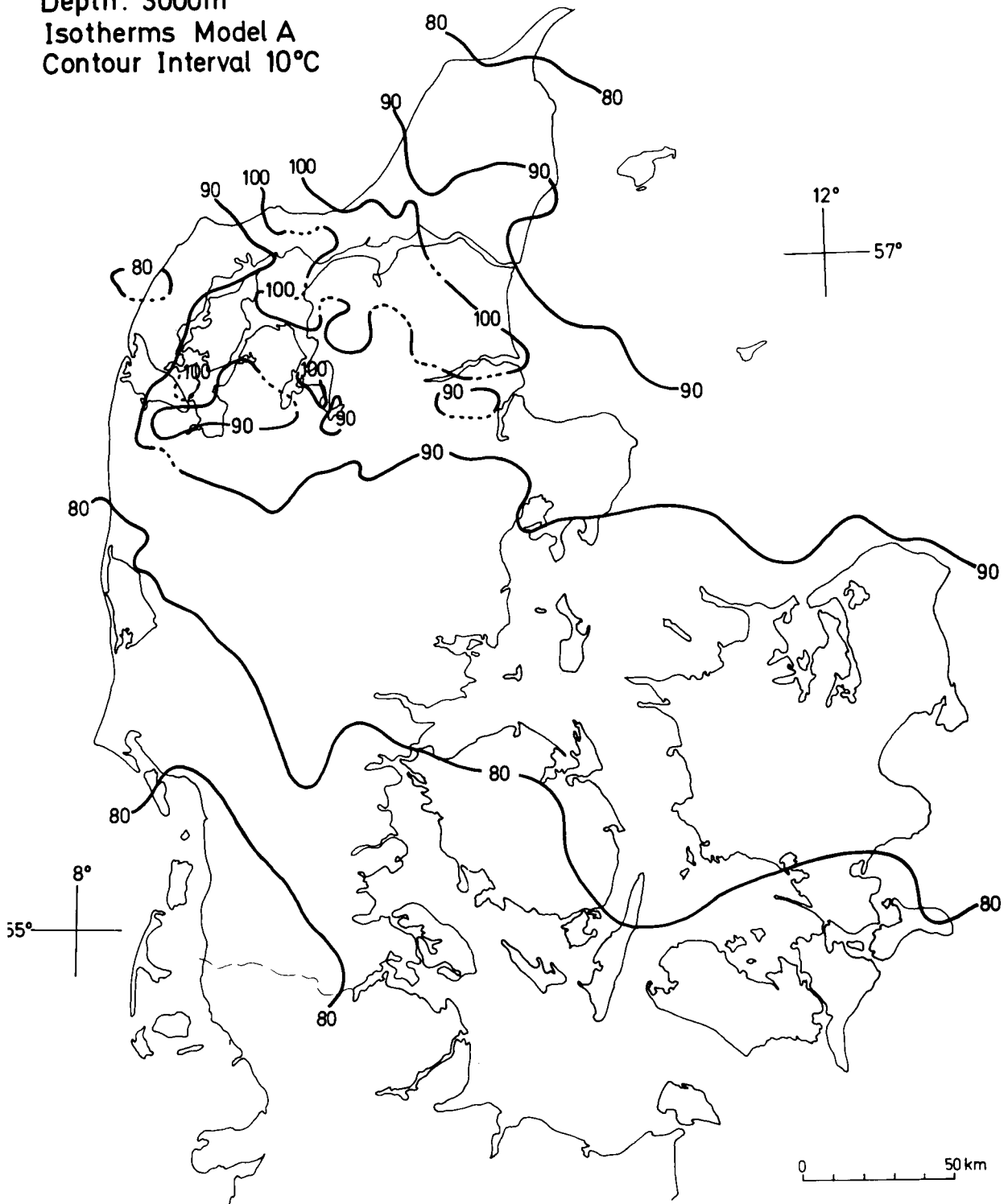


Fig. 44. Isothermer for 3000 m's dybde. Model A.

Område D er begrænset til det sydligste Jylland. Det er udskilt på grundlag af forekomst af zechstein kalksten, og i det sydvestligste hjørne tillige af Bunter Sandsten Formationen.

Kendskabet til formationerne er begrænset, men det skønnes at en nøjere efterforskning af reservoir-egenskaberne er rimelig og nødvendig.

Område E er karakteriseret ved at Gassum Formationen ligger dybere end 3000 m og ved at lagene er stærkt forstyrrede af saltbevægelser (diapirdannelse). Inden for dele af området ligger Haldager Sand og Frederikshavn Member i det omtalte dybdeinterval. Begge lagserier forventes generelt at have begrænset gode reservoirgenskaber, idet Haldager Sand ofte er tynd (ringe mægtighed) og Frederikshavn Member er lerholdig. Området må ikke betragtes som en homogen enhed med hensyn til reservoirgenskaber, men som et område inden for hvilket en af de to formationer eller begge rent lokalt vil kunne udnyttes med udbytte. Som en generel oversigt kan området deles i tre dele.

I den nordøstlige del formodes begge formationer at have de bedste reservoirgenskaber. Centralt i dette område ligger Haldager Sand under 3000 m og den samlede mægtighed af sandlagene i Frederikshavn Member er ukendt, men formodet lille.

I den nordvestlige del forventes Frederikshavn Member at være præget af ler, mens Haldager Sand kan have en ekstraordinær tykkelse i randsynklinalerne omkring saltstrukturene.

I den sydvestlige del findes der indikationer på at Haldager Sand kan have gode reservoirgenskaber. Regionalt set er sandserien tynd, men det vides fra seismiske undersøgelser, at der forekommer betydelige fortykkelser i enkelte randsynklinaler.

Område F angiver områder uden muligheder for geotermisk indvinding fra sedimentære aflejringer, idet grundfjeldet ligger for højt. Signaturen er angivet i to regioner: nordligste Vendsyssel og Ringkøbing-Fyn Højderyggen. I den forbindelse er det kun relevant at omtale sidstnævnte område nærmere.

Langs flankerne af Ringkøbing-Fyn Højderyggen forekommer der palæozoiske aflejringer med forholdsvis ringe reservoirgenskaber. Således kendes kambrisk kvartsitisk sandsten på Sjælland, karbon kalksten på Falster og rotliegendes sandsten på bl.a. Falster og Lolland.

Ovenstående opdeling af landet i seks områder med generaliserede geotermiske reservoirgenskaber skal ses som et forsøg på at skabe overblik over den viden der er etableret i nærværende projekt. Område A er det bedst kendte og må generelt betragtes som et

gunstigt område. Område B og C forventes ligeledes at være positive i begrænsede dele, men yderligere undersøgelser, evt. nye borer og ny seismik, vil være påkrævet.

Vurdering af reserverne

På grundlag af de geologiske og geofysiske undersøgelser er der foretaget en vurdering af de geotermiske reserver i Danmark. Formålet med vurderingen er, at tilvejebringe et skøn over hvor stor en del af de estimerede ressourcer, der ud fra et energimæssigt synspunkt kan udnyttes. Der tages således ikke hensyn til økonomiske og afsætningsmæssige forhold i undersøgelsen; dog viser det sig uundgåeligt at inddrage en simpel økonomisk analyse i vurderingen.

I vurderingen er medtaget områderne A, B og C, der anses som de geotermisk mest positive områder. Selv om områderne B og C kun forventes at have positive reservoirgenskaber i begrænsede dele, er de i vurderingen medtaget i deres fulde udstrækning. Til gengæld er områderne D, E og F overhovedet ikke inddraget, selv om der lokalt i disse områder kan være gode reservoirgenskaber. Område C er her inddelt i to områder, C1 og C2. Vurderingen omfatter således ialt 4 områder: A, B, C1 og C2 som vist på fig. 45.

Inden for hvert af områderne regnes reservoirgenskaberne konstante. De anvendte værdier er tabelleret i tabel 4. På grund af den store usikkerhed med hensyn til beregning af transmissiviteten er der angivet to (lige sandsynlige) værdier for væskepermeabiliteten.

Vurderingen er foretaget ved dels at bestemme det totale energiindhold i reservoirerne og dels ved at beregne hvor stor del af denne energi, der netto kan udnyttes under forudsætning af, at udvindingen foregår ved hjælp af enkelte anlæg med én produktionsboring og én injektionsboring. Det er endvidere antaget, at energien anvendes til fjernvarme, hvor temperaturkonverteringen mellem geotermi- og fjernvarmekredsløbet foregår ved hjælp af varmepumper.

Anlæggenes levetid er fastsat til 25 år, og fjernvarmeeffekten for et enkelt anlæg er bestemt som den økonomisk optimale værdi fundet ud fra en simpel økonomisk analyse.

For at undersøge indflydelsen af de i beregningerne indgående parametres størrelser, er der foretaget en sensitivitsanalyse for et enkelt tilfælde. Heraf viser det sig, at størrelsen af reservoirs ydeevne og af de økonomiske data praktisk taget ingen indflydelse har på størrelsen af udnyttelsesgraden, dvs. på



Fig. 45. Lokalitetskort for de fire områder hvori vurdering af reserverne er foretaget.

Fig. 45. Location maps of the four areas where the reserves have been evaluated. – The data are given in table 4.

Tabel 4 Datagrundlaget for vurderingen af reserverne

Område	A	B	C1	C2
Formation(er)	Gassum	Skagerrak	Tønder og Bunter	Bunter og Tønder
Areal	5200 km ²	3100 km ²	1700 km ²	9000 km ²
Dybde til reservoirmidte	2500 m	2500 m	2500 m	2500 m
Temperatur	85°C	80°C	80°C	75°C
Net sand tykkelse	60 m	250 m	150 m	80 m
Brinepermeabilitet 1	100 mDarcy	50 mDarcy	50 mDarcy	40 mDarcy
2	20 mDarcy	15 mDarcy	15 mDarcy	15 mDarcy
Transmissivitet 1	6,0 Darcymeter	12,5 Darcymeter	7,5 Darcymeter	3,2 Darcymeter
2	1,2 Darcymeter	3,75 Darcymeter	2,25 Darcymeter	1,2 Darcymeter
Porøsitet	20%	20%	20%	20%

det samlede energiindhold, der netto kan udnyttes, når der tages hensyn til, at der skal forbruges energi til pumpearbejde m.v. for at udvinde og anvende den geotermiske energi. Derimod fremgår det klart af undersøgelsen, at transmissiviteten har stor indflydelse på de økonomiske forhold. Endvidere viser det sig, at udnyttelsesgraden vokser med reservoirtemperaturen, hvorimod et højt fjernvarmetemperaturniveau har den modsatte virkning. Vurderingen resulterer i en værdi for udnyttelsesgraden på ca. 14%.

De vigtigste beregningsresultater er sammenfattet i appendix 3. Her er resultaterne for de 4 områder og for det samlede område tabelleret for to forskellige transmissivitets- og fjernvarmetemperaturniveauer.

Når resultaterne opsummeres giver vurderingen en total bruttoeffekt på ca. 150 GW og en total nettoeffekt på ca. 60 GW. Det vil sige, at hvis de samlede undersøgte områder blev udnyttet, ville de i 25 år kunne levere en fjernvarmeeffekt på ca. 150 GW ved hjælp af den geotermiske nettoeffekt på ca. 60 GW og en brændselseffekt på ca. 90 GW.

Idet hele landets nuværende effektforbrug til rumopvarmning er ca. 10 GW, ses det, at der er tale om ganske betydelige reserver.

Effekt faktoren, der er forholdet mellem fjernvarmeeffekten og brændselseffekten, er fundet til ca. 1,7. Da effekt faktoren for et konventionelt fjernvarmeværk er ca. 0,85, kan det konkluderes, at i de områder, hvor det er geologisk, teknisk og økonomisk muligt at anvende geotermisk energi i stedet for, kan ca. halvdelen af brændselsforbruget spares.

Da det samlede undersøgte områdeareal er ca. 19000 km², findes i middel en bruttoeffekttæthed på ca. 8 MW/km² og en nettoeffekttæthed på ca. 3 MW/km².

Mens de fundne værdier for brutto- og nettoeffekttæthederne varierer med op til en faktor 3 fra tilfælde til tilfælde, er de beregnede værdier for effekt faktoren og udnyttelsesgraden næsten konstante.

Det fremgår af undersøgelsen, at det tilsyneladende

de gunstigste område, når markedsforholdene ikke tages i betragtning, er område B. Da det geologiske kendskab til dette område imidlertid er meget begrænset, skal nødvendigheden af yderligere geologiske undersøgelser i dette område påpeges.

Endelig skal det understreges, at den væsentligste årsag til, at kun en mindre del af landets energiforbrug til rumopvarmning vil kunne dækkes ved hjælp af geotermiske anlæg (såvel som ved hjælp af andre fjernvarmeanlæg) er de meget store omkostninger ved distributionen af fjernvarmevandet.

Tak

Dansk Olie & Naturgas A/S takkes for at have taget initiativet til projektet og nedsat en arbejdsgruppe fra de tre nedennævnte institutioner. For frigivelse af borehulsdata fra Hyllebjerg 1, Skive 1, Kvols 1, Rødding 1 og Oddeund 1 takkes Dansk Boresekskab A/S. Borekerneanalyser, tegninger, fotografisk reproduktion, korrektion af den engelsksprogede tekst og renskrivning af manuskriptet er udført med omhyggelighed af personale ved Danmarks Geologiske Undersøgelse, Forsøgsanlæg Risø og Laboratoriet for Geofysik ved Aarhus Universitet. Alle de der på denne måde har bidraget til projektets gennemførelse eller har deltaget i den faglige diskussion bringes hermed vores bedste tak.

Acknowledgements

This project was initiated by Dansk Olie & Naturgas A/S and carried out by a research team of the Geological Survey of Denmark, Risø National Laboratory, and Laboratory of Geophysics at Aarhus University. Dansk Boresekskab A/S has released well-data from

the Hyllebjerg 1, Skive 1, Kvols 1, Rødning 1, and Oddesund 1 borings for this publication. The core analyses, drawings, photographic reproductions, and the manuscript have been carefully and responsibly prepared by the staffs of the Geological Survey of Denmark, Risø National Laboratory, and the Laboratory of Geophysics at Aarhus University. We have also benefitted from valuable discussions with the many individuals who have interested themselves in the project. – We wish to extend our sincere thanks to all who have contributed to its success.

English Summary

Mapping of potential geothermal reservoirs in Denmark

The present report is the result of a research program initiated in 1978, when the Danish exploration company Dansk Olie & Naturgas A/S (D.O.N.G.) was allocated exclusive rights to explore for and to produce geothermal energy. The program was undertaken by the Geological Survey of Denmark (DGU), Risø National Laboratory, and Laboratory of Geophysics at Aarhus University, with the purpose to evaluate the feasibility of production of geothermal energy and of locating the most promising areas. The program was to include analyses and evaluations of existing geological, geophysical, and geothermal data and acquisition of new data.

The first general chapter comprises a review of the geological, structural, and stratigraphical aspects as well as of the environments of deposition, from the relevant parts of the Danish subsurface sedimentary sequence. The main structural elements are shown in fig. 1, and the chronostratigraphical and lithostratigraphical subdivision of the sequence are illustrated in fig. 2. Further details may be found in the literature cited.

The criteria used to select the reservoir formations dealt with in the present report are described in the following chapter. In preparing the project, it was decided that all formations mentioned in former reports would be included in order to assure that all latent potentialities in these preliminary studies would be dealt with. The Palaeozoic formations included are known from few boreholes only, whereas the five Triassic and two Jurassic – Lower Cretaceous formations are rather well known.

Evaluation of temperatures

The reservoir temperature evaluations are based on the measured values (mostly BHT-values) and newly calculated model values. The isothermal maps presented in the present report are model maps constructed on the basis of $10' \times 6'$ or $5' \times 3'$ "grid" temperatures calculated as solutions (eq. (3), p. xx) to the one-dimensional heat equation (eq. (2), p. xx). From sea level to the basis of the Triassic, the thermal models used consist of 7 layers, each having a constant vertical thermal conductivity (tables 1 and 2, p. xx). These conductivities are estimated from sample measurements (appendix 2 and fig. 3) and, indirectly, from heat flux and temperature gradient measurements or estimates in deep boreholes (fig. 6). Radioactive heat production is measured at low values (appendix 2 and fig. 4) with insignificant temperature influence at depths of main interest. A constant model value of $1.0 \mu\text{W m}^{-3}$ is used. Three temperature models (A, B, and C) are presented. The parameters preferred are used in model A; model B and C contain a combination of conductivity and heat flux which produces lower (B) and higher (C) temperatures. Information on the geothermal flux exists from only few localities (fig. 5). Based on those values and the observed variations in regions adjacent to Denmark, the constant values of 60, 50, and 80 mW^{-2} are chosen for models A, B, and C, respectively.

At the present stage of knowledge no lateral thermal conductivity and heat flux variations could be modelled. Most of the depth values at grid points are read from the generalized depth maps (figs. 14, 23, 30 and 37).

Models A, B, and C isothermal maps are presented for Near Top Triassic (figs. 24, 25, and 26), Base Haldager Sand (figs. 31, 32, and 33) and Base Upper Cretaceous limestone (figs. 38, 39, and 40). Model A isotherms are presented for the approximate base Triassic (fig. 15) and for the depths of 2000 and 3000 m (figs. 42 and 44). The reservoir temperature evaluations are based mainly on model A results. In areas without or with only poor information the temperature range given by models B and C is to be considered.

Evaluation of porosity, permeability, and net sand thickness

The evaluation is based on petrophysical logs and core analyses. The porosity values based on petrophysical logs are calculated from the following:

Formation Density Log	FDC
Neutron Log, Compensated	CNL
Sonic Log, Interval Transit Time	ITT
Spontaneous-Potential Log	SP
Resistivity Log	

The log quality from the Danish onshore boreholes varies greatly as they have been measured over nearly a 35 year period.

As far as possible each log has been evaluated, calibrated, and corrected for borehole diameter, drilling fluid, temperature, and lithology. For each borehole, the log has been used for identification of the reservoir beds which have been subdivided into a series of 0.5–5 m thick layers with homogeneous petrophysical characters. The porosity values tabulated are weighted average values for the individual beds; similarly, the values for the reservoirs are weighted values based on the individual beds.

Plugs drilled from cores have been used for measuring porosity and air-permeability. Furthermore, parameters such as grain size, sorting, and degree of consolidation have been evaluated from microscopic studies of the plugs as well as of the drill cores.

Porosity has been measured on the plugs using the Boyle's Law method or by injection of mercury and measurements of the injected volume. (The latter has been used as a supplementary method).

Permeability has been measured as air-permeability: The relative pressure needed to force a given volume of nitrogen through the plug.

The accuracy for the porosity measurements is within 1%; for permeability, within 10%. The porosity, permeability, net sand thickness, and mid depth values are presented in the table, appendix 1, in the figures 12, 13, 18, 19, 21, 22, 28, 29, 35, and 36, and in plates 1–8.

Depth mapping

As a basis for evaluation of depth and extent of the reservoirs, reflection seismic data have been interpreted and isochrone maps for continuous reflectors have been drawn. Approximately 450 seismic lines with a total length of 9000 km have been interpreted, and well-velocity surveys from 22 boreholes in Jylland have been used for correlation between lithostratigraphic boundaries and seismic reflectors.

Two way time maps have been the basis for constructing the following generalized depth maps: Base Upper Cretaceous (fig. 37), Base Haldager Sand (fig. 30), Near Top Triassic (fig. 23), and Near Top Bunter

Sandstone Formation (fig. 14). Two way time maps for top Triassic are presented at plates 9–10.

Conversion of time maps to depth maps has been done by estimating regional velocity functions for each horizon from the two-way time values, and the depth figures from boreholes with well-velocity surveys. On Sjælland it has been necessary to use stacking velocities, as well control is missing. The estimated velocity functions may differ from the borehole data with values up to 250 m, thus local corrections have been imperative. The time maps have not been migrated.

In regions without seismic data or where mapping has not been carried out, the depth contours have been constructed from borehole data and controlled by selected seismic lines.

Description of the reservoir formations

For each formation, the lithostratigraphy, geological age, lithology, geometry, depth, porosity, permeability, and temperature are described. Of all the formations formally established in the literature, only the Skagerrak Formation is not described individually below. It is a marginal deposit which is time equivalent with the most of the other Triassic formations (cf. Bertelsen 1980). Centrally in the Danish Subbasin, there is a more or less homogeneous transition zone between the Skagerrak Formation and the other Triassic formations – except for the Gassum Formation. Therefore the data for the Skagerrak Formation are included in the description of the relevant formations.

Presented with each formation description are maps showing thickness, mid depth, porosity, permeability, and temperature. The isopach curves are based mainly on figures read from the petrophysical logs; therefore the isopach curves show only the relative regional variation.

All depth figures are given in metres and refer to mean sea level (MSL).

Palaeozoic

Apart from formations referred to a specific part of the Palaeozoic, deposits of presumed Palaeozoic age are also included in the map fig. 9.

Cambrian quartzitic sandstone

Fig. 9, appendix 1.

Lithostratigraphic subdivision: Presumably equivalent with the Balka Quartzite (island of Bornholm).

Geological age: Lower Cambrian or Eocambrian.

Lithology: Light grey quartzitic sandstone.

Extension, thickness, and depth: In the Slagelse 1 borehole a 6 m thick series is found, which is not penetrated. The formation is probably present in large areas in the easterly Danish region.

Depth to the top is 2928 m.

Porosity and permeability: Porosity is 4% and permeability 3 mD.

Temperature: For the Slagelse 1 boring, the calculated values as well as the measured BHT indicate ca. 90°C.

Final remarks: The formation is evaluated not to be a suitable geothermal reservoir.

Carboniferous limestone

Fig. 9, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: None.

Geological age: Lower Carboniferous, Viséan.

Lithology: Limestone, marlstone, and claystone with subordinate silt/sand intercalations. Limestone dominates the uppermost 50 m as well as the lowermost 100 m of the penetrated series in the Ørslev 1 borehole. It is hard, very dense, reddish-grey to greyish-black with numerous fossil fragments. Carbonate grains make up approximately 30% of the rocks which further consists of fine grained or crystalline carbonate.

Extension, thickness, and depth: The Carboniferous limestone is only found in the Ørslev 1 boring, but is also expected to be present in the southern part of the Danish area. The drilled section is 525 m thick and the maximum thickness of the carbonates is 200 m.

Top of the limestone is found at 2035 m.

Porosity and permeability: The highest porosity found is 8%.

Temperature: 60–70°C is normal for 2000 m depth in that region.

Final remarks: The limestone is dense and interbedded by claystone. It is estimated not to be a suitable geothermal reservoir.

Rotliegendes sandstone

Fig. 9, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: None.

Geological age: Pre-Zechstein, Rotliegendes (inferred).

Lithology: Sandstone and siltstone intercalated by clay. Reddish brown. Scattered limestone and anhydrite-concretions occur. Especially south of the Ringkøbing-Fyn High, the silty and sandy beds often have a fine grained matrix.

Extension, thickness, and depth: The sandstone formation is found predominantly south of the High, and only occasionally on the High and north of it. The maximum thickness registered south of the High is 225 m, on the High 170 m, and in the Danish Subbasin less than 100 m. The top of the formation is found at 1800 m to 3100 m, 1200 m, and 4800 m respectively.

Porosity and permeability: The porosity seems to reflect local variations of the lithology, rather than being depth related. 10% is the general figure, with a single deviation to ca. 20%. Permeability – ca. 4 mD.

Temperature: For the depth interval 1800–3100 m, the temperature typically is between 60 and 80°C, on the High (1200 m) ca. 40°C, and in the Subbasin (4800 m) approximately 140°C.

Final remarks: The formation is assumed to have an inferior value as geothermal reservoir. However, the data density is small.

Zechstein carbonates south of the Ringkøbing-Fyn High

Fig. 10, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Z-1, Z-2, and Z-3 Carbonate Formations, Middle Carbonate Member of the Anhydrite Formation (Clark & Tallbacka, 1980).

Geological age: Upper Permian, Zechstein.

Lithology: Limestone, which is a subordinate part of a cyclic deposit of limestone, anhydrite, and halite.

Three types of limestones dominate: 1) very fine-grained, 2) up to 50% carbonate grains in a fine grained matrix, and 3) algal boundstone (rarely bryozoan boundstone).

The most coarse-grained deposits are found in a region close to and parallel with the Ringkøbing-Fyn High, whereas the more fine-grained material is found further south in the Basin.

Extension, thickness, and depth: The maximum thickness (in total 125 m) of the limestone series is found marginally, along the Ringkøbing-Fyn High. The depth varies from 2000 m to 3000 m.

Porosity and permeability: The general porosity values are low, ca. 10%, and the air-permeability, ca. 1 mD. Dissolution, fissures etc. have created a patchily distributed secondary porosity and permeability which have not been evaluated.

Temperature: In the above-mentioned depth interval the temperature will normally range between 60°C and 90°C.

Final remarks: The stated reservoir characteristics disregard the secondary porosity and permeability

which may turn it to a profitable geothermal reservoir.

Triassic

Bunter Sandstone Formation

Figs. 11–14, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Bacton Group, Bunter Sandstone Formation (Bertelsen 1980).

Geological age: Lower Triassic, Jakutian to Lower Olenikian.

Lithology: Red-brown and yellow-brown, fine-grained sand-, silt-, and claystone, locally with a high content of carbonate, anhydrite and mica. Regional variation: 1) fine-grained sandstone and siltstone south of the Ringkøbing-Fyn High, 2) fine- to coarse-grained sandstone north of the High, and 3) further to the north in the Danish Subbasin, the coarse-grained sandstone of the Skagerrak Formation.

Extension, thickness, and depth: The formation covers the basins and, partly, the Ringkøbing-Fyn High.

Generally the thickness does not exceed 300 m, however, centrally in the Danish Subbasin the Bunter Sandstone Formation/ Skagerrak Formation is estimated to be more than 900 m thick. On the High, the series is thin or locally missing.

Net sand thicknesses vary, probably locally.

The top of the formation is found at 1000–1500 m on the High, dipping to 2000 m in the North German Basin and 5000 m in the Danish Subbasin.

Porosity and permeability: Both of the parameters decrease with increasing depth. 20–30% porosity is found at 1000–2000 m and less than 15% below 3000 m. The highest air-permeability found is ca. 1000 mD.

The best properties are assumed to be found close to the flanks of the Ringkøbing-Fyn High because of the suitable depth of the formation. Northernmost in the Danish Subbasin, the Skagerrak Formation may locally have good reservoir characteristics.

Temperature: On the High the temperature is estimated to be 30–50°C and in South Jylland, 60–80°C. In the Mors 1 boring corrected BHT-values indicate temperatures between 110°C and 140°C. Centrally in the Subbasin, the temperature exceeds 140°C. Model A isotherms shown in fig. 15 refer to the approximate base Triassic horizon.

Final remarks. The value of the depth map, fig. 14, is impaired by essential uncertainties, as the relevant velocity functions, necessary for depth conversion of the two-way time map to depth map, are missing.

The reservoir properties have been evaluated on very few core analyses and SP-resistivity measurements. However, on the basis of this material the formation is supposed to have geothermal reservoir characteristics.

Ørslev Formation

Fig. 16.

Lithostratigraphical subdivision: Lolland Group, Ørslev Formation (Bertelsen 1980).

Geological age: Lower to Middle Triassic, Upper Olenikian to Lower Anisian.

Lithology: The formation can be subdivided into a lower and an upper part. The lower part is dominated by halite and anhydrite interbedded by claystone in the southern region, and by dolomitic limestone, claystone, and marlstone in the northern region. The upper part of the formation consists of silty, reddish-brown claystone. Anhydrite occurs sporadically throughout the entire formation. In the regional transition zone to the Skagerrak Formation, siltstone may dominate the formational sequence.

Extension, thickness, and depth: The formation covers nearly the whole study area.

The general thickness found is 100–300 m, thinning on the Ringkøbing-Fyn High, and exceeding 400 m centrally in the Danish Subbasin.

In the table (appendix 1) and on the maps, the net sand thickness is calculated together with the figures from the Bunter Sandstone Formation. Within the above-mentioned transition zone to the Skagerrak Formation, the total thickness of the sand-siltstone beds is 50–150 m.

Top of the formation is found at 800–1500 m on the High, dipping to 1800–2000 m to the south, and to more than 4000 m centrally in the Danish Subbasin.

Porosity and permeability: 3–5% porosity. Permeability is supposed to be inconsiderable as the sediments are very fine-grained.

Temperature: Centrally in the Subbasin the temperature is estimated to exceed 120°C. 35–50°C on the High and 60–70°C south of the High are estimated as typical temperatures.

Final remarks: Though the formation is poorly known, it is evaluated to have inferior geothermal reservoir characteristics. In the transition zone to the Skagerrak Formation, it may be evaluated together with other Triassic formations.

Falster Formation

Fig. 17.

Lithostratigraphical subdivision: Lolland Group, Falster Formation (Bertelsen 1980).

Geological age: Middel Triassic, Anisian to Lower Ladinian.

Lithology: Grey and greyish-green, rarely brown claystone, marlstone, and limestone, with scattered occurrences of anhydrite. Generally limestone is common in the lower part of the formation, and claystone in the upper part. Intercalations of sand occur in the transitional zone to the Skagerrak Formation in the Danish Subbasin.

Extension, thickness, and depth: The formation covers nearly the whole study area (cf. fig. 17).

The thickness is generally between 100 to 200 m, but the net sand thickness is inferior. A few 5 m thick sand-siltstone beds are found in the above-mentioned transitional zone.

On the Ringkøbing-Fyn High, the depth ranges from 800 m to 1200 m, south of the High to 1500 m, and centrally in the Subbasin to below 3700 m.

Porosity and permeability: 10% porosity. Based on the mixed lithology and on the cemented sandstone, the permeability is also concluded to be low.

Temperature: South of the Ringkøbing-Fyn High the temperature is evaluated to be approximately 50°C, on the High 30–40°C, and more than 100°C centrally in the Subbasin.

Final remarks: The formation is poorly known, but is assumed not to have a suitable geothermal potential.

Tønder Formation

Figs. 11, 18–19, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Jylland Group, Tønder Formation (Bertelsen 1980).

Geological age: Middle Triassic, Upper Ladinian.

Lithology: Reddish brown to greenish, silty claystone with scattered occurrence of anhydrite. A few well-defined beds of greyish-green and reddish-brown, silty, fine-grained sandstone are found uppermost in the formation.

To the north in the Danish Subbasin, the sand content and the number of sand beds increase, but the beds are thinner and the sorting grad lower.

Extension, thickness, and depth: The formation is found all over the study area, but may be absent on the Ringkøbing-Fyn High. To the north a regional transition zone to the Skagerrak Formation is found. In the southeastern part of the Danish Subbasin, the lithological characteristics change and the series is referred to the Ringe Beds (cf. Bertelsen 1980). Reservoir properties of the Ringe Beds are calculated here together with those of the Tønder Formation.

Average thickness is between 100 and 300 m. Net sand thickness is only 20–40 m, but up to 100 m in the Danish Subbasin.

Depth to top of the Formation is 800–1000 m on the High, 1000–1500 m in South Jylland, and more than 3500 m in parts of the Subbasin.

Porosity and permeability: The porosity values vary very greatly. In well-defined sand beds in South Jylland, the porosity is 20–30% or more. The porosity values are smaller in the Subbasin, probably due to clay content and cementing.

The porosity decreases with depth, from 30–40% at 1000 m to 10% at 3500 m (fig. 11). In series with good reservoir properties, the air-permeability is 1000 mD but, in beds with low porosity values, the permeability values are significant smaller.

Varying sedimentary facies and cementing may be the reason for changing values of porosity and permeability within short distances.

Temperature: More than 100°C is expected centrally in the Danish Subbasin. On the northern flank of the Ringkøbing-Fyn High 75°C seems typical, 30–40°C on the High, and 60°C south of the High.

Final remarks: Well data on the Tønder Formation are scarce, but based on available data the Formation is interpreted to have geothermal reservoir characteristics.

Gassum Formation

Figs. 20–26, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Mors Group, Gassum Formation (Bertelsen 1978 and 1980).

Geological age: The formation is diacron. Centrally in the Danish Subbasin it is of Upper Triassic age (Rhaetian), but marginally (to the north) it is mainly of Lower Jurassic age (Hettangian to Sinemurian).

Lithology: Fine to medium-grained, light grey sandstone, interbedded by claystone and siltstone. Scattered coal beds occur. Generally the Formation is subdivided into three members, a lower and an upper dominated by sandstone, and a middle member with claystone and siltstone. Locally additional members may occur uppermost and lowermost. As a regional trend, the Formation is characterized by being more fine-grained to the south.

Extension, thickness, and depth: The main extension is found in the Danish Subbasin (see fig. 21). The general thickness here is 100–200 m, but exceeding 200 m in North Sjælland and northern Jylland.

The net sand thickness varies locally, but generally exceeds 50 m in the central parts of the Danish Subbasin (northern Jylland and North Sjælland). South of

the Ringkøbing-Fyn High, on the islands of Lolland and Falster, it exceeds 50 m locally.

The Formation is deepest in the central part of the Subbasin, south of the Limfjord. The depth varies from 2400 m to approximately 4000 m, varying greatly within short distances because of the strong influence of halokinesis in this region. In a regional zone from Djursland to North Sjælland, the depth is more than 2500 m, but in the marginal zones to the south and the northeast, it decreases to 500–1000 m.

Porosity and permeability: The porosity decreases with the depth; down to 1500 m it is 30–40%, at 2000 m approximately 25%, and at 3000 m 12%. Generally the brine-permeability varies from 8 mD at 3200 m to 300 mD at 1500 m depth. However, such parameters as the grain size and the clay content influence the permeability, so a general correlation to porosity and depth cannot always be established. An example is found in the very low permeabilities measured in the Frederikshavn 2 and Skagen 2 borings (cf. fig. 22).

Temperature: The formation temperatures at 1000, 2000, and 3000 m depth are estimated to be 35–45°C, 60–75°C, and 80–110°C respectively. The highest temperatures, 100–120°C, are expected centrally in the Danish Subbasin. Model A isotherms for “Near Top Triassic” (fig. 24) are regarded as the best basis for a regional evaluation. Good accordance between those model values and the measured values is found for the central part of the Subbasin. Outside this area the models B and C isotherms must be included in the evaluation of the temperature, due to missing control points. Anomalous high temperatures may be found in areas with a great thickness of the overlying Fjerritslev Formation and a thin Upper Cretaceous limestone series.

Final remarks: Due to missing seismic data and/or velocity analyses, the depth mapping of Top Triassic (partly top Gassum Formation) is rather uncertain in the margin of, and outside, the Danish Subbasin.

For evaluation of the reservoir parameters the well data density is sufficient in northern Jylland only.

Based on the present data, the Formation is estimated to have good geothermal reservoir properties in northern Jylland. In North Sjælland it may be a potential reservoir.

Jurassic – Lower Cretaceous

Haldager Sand

Figs. 27–33, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Haldager Formation, Haldager Sand (Michelsen 1978).

Geological age: Middle Jurassic.

Lithology: Light olive grey, fine to medium-grained sandstone and siltstone, which may contain mica, plant remains, and coal. The sandstone beds are interbedded by thin claystone layers. In the southwestern part of the deposition area, the sequence is thin with varying lithology, including badly sorted sandstone and clayey and sandy siltstone.

Extension, thickness, and depth: The Haldager Sand is found in the main part of the Danish Subbasin. The maximum thickness, ca. 150 m, is in southeastern Vendsyssel. 25–30 m is the general thickness in the central and northeastern parts of the Subbasin. Locally great thicknesses are found in the rim synclines; e.g. south of Linde-Vejrum and at Tostrup salt-structures.

Depth to top of the Haldager Sand varies from 1000–2000 m to more than 3000 m centrally in the Subbasin. In the rim synclines the depth may be more than 2500 m.

Porosity and permeability: Generally the porosity decreases with the depth; e.g. from 30% at 1500 m to 20% at 2500 m.

Air-permeability has been measured from only 3 boreholes. It varies from 2000 mD at 33% porosity to 500 mD at 21%.

Temperature: The model A isotherms (cf. fig. 31) are regarded as a reliable basis for the regional evaluation. However, in the northernmost Jylland the model B and/or C may be used. Typically the temperature is found to be between 60 and 80°C, and with a maximum of 80–100°C centrally in the Subbasin.

Final remarks: The Haldager Sand is evaluated to have reasonable good reservoir characteristics (incl. depth) in Himmerland and on the island of Mors. However, the net sand thickness cannot be determined due to missing well data in these regions. Seismic data indicate considerable sand-bed thicknesses in the rim synclines associated with certain salt structures.

Frederikshavn Member

Figs. 34–36, appendix 1.

Lithostratigraphical subdivision: Bream Formation, Frederikshavn Member (Michelsen 1978).

Geological age: Upper Jurassic to Lower Cretaceous, Kimmeridgian to Valangian.

Lithology: Siltstone and fine-grained sandstone interbedded by silty claystone. The sandstone may be clayey and mica, pyrite, micro lignite, and glauconite may occur.

The general grain size, thickness, and number of sandstone beds increase to the northeast.

Extension, thickness, and depth: The Member is found only in Jylland north of the Ringkøbing-Fyn High.

The thickness of the Member varies from 50–250 m, and the net sand thickness, from 5–35 m in Himmerland to 70 m in Vendsyssel. The depth to the top of the Member is approximately 1000 m, but more than 2000 m centrally in the Subbasin and 200 m northernmost in Jylland.

Porosity and permeability: The porosity is relatively high, 25–35% at 1000 m depth to 15–20% at 2000 m. The varying content of glauconite, mica and clay has a negative influence.

At 25–35% porosity the permeability is assumed to be 500–1000 mD.

Temperature: Model A isotherms give a reliable figure for the basis of Upper Cretaceous limestone (fig. 38), but for northernmost Jylland, model B and C may be used. In the deepest part of the Subbasin, the general temperature level will be 50–60°C and locally 70°C.

Final remarks: In the deeper parts of the Subbasin, porosity and permeability values are low and the sequence is characterized by the scattered occurrence of thin sandstone beds of restricted extension. The Frederikshavn Member is evaluated to be of inferior value as a geothermal reservoir.

Hydrochemistry

Nearly all onshore boreholes in Denmark have been drilled for oil and gas exploration but, since there has been no success, only very few drill-stem tests have been carried out. Therefore, only the general trend of the chemical composition of the geothermal water can be given at present. As a rule the salinity of the water increases with the depth as follows: 10% at 1000 m, 20% at 2000 m, and 30% at 3000 m (valid only for the sandstone formations).

Regional reservoir evaluations

Based on analyses and descriptions of the reservoirs and the seismic mapping of the relevant horizons the study area can be subdivided into 6 regions with differing geothermal reservoir characteristics. Only sequences within the depth interval 2000–3000 m have been included in the evaluation, as the temperature may be too low above 2000 m and the permeability too low below 3000 m due to diagenesis etc. These

criteria are used here as a general basis, since no technical and economical factors have been studied in detail.

For the conclusions below, the depth maps have been used to select formations occurring in the mentioned depth interval and to present them in fig. 41. On the basis of this map and on the studies of the reservoir rocks, the study area has been subdivided and classified into 6 regions as presented in fig. 43. This classification gives a generalized picture of formations which may contain potential reservoirs in the different parts of the country.

As a general trend for the temperature interval in the sequence in question, Model A isotherms for 2000 and 3000 m are presented in figs. 42 and 44 respectively.

Area A comprises the region with the Gassum Formation as the principal reservoir. The Haldager Sand is found in restricted areas within the depth interval.

In Jylland, the Gassum Formation is evaluated as having good reservoir characteristics, but of varying values. To the northeast the most positive characters are expected, and in parts of this area the Haldager Sand may be an alternative or supplementary reservoir.

In North Sjælland, the Gassum Formation is known only from the Lavø 1 boring, but based on known regional conditions good reservoir characteristics may be expected.

Area B comprises the region where the Skagerrak Formation is the main target. In the southernmost part, the Gassum Formation is found below 2000 m depth and is expected to overlay the Skagerrak Formation directly. The reservoir characteristics are known only from two boreholes, and here only from the uppermost part of the Skagerrak Formation. The coverage and quality of the seismic data are poor and a reliable seismic mapping cannot be based on these data.

Thick sandstone beds and series are expected, but due to changes in the local sedimentary environmental conditions, the reservoir characteristics may vary both horizontally and vertically.

The northern boundary is drawn from poor seismic indications of the 2000 m depth contour for top pre-Upper Permian.

Area C comprises the regions where the Bunter Sandstone and Tønder Formations may be the main target. Area C is subdivided into two regions marked "B" and "T" on the map, fig. 43. The Gassum For-

mation is either not situated deeply enough or has inadequate reservoir characteristics.

On Sjælland the deposits are known only from the seismic data, but due to the small distance to the Fennoscandian Border Zone, where corresponding deposits are known, it is reasonable to expect relatively good reservoir characteristics.

In Jylland, south of area A, these older Triassic formations are known only from two boreholes, and the coverage of seismic data is poor. The beds dip toward the north, so in the southern part, sub-area "B", the Bunter Sandstone Formation is found within the depth interval, and in the northern part, sub-area "?T", the Tønder Formation is found. Sand content and grain size is supposed to increase toward the north.

Area D comprises the region in South Jylland with Zechstein carbonates and, in the southwesternmost part of the region, the Bunter Sandstone Formation is an alternative reservoir.

The formations are known only partly, but further exploration and research of the reservoir parameters are reasonable.

Area E is the region characterized by complicated structural features due to halokinesis, and by the occurrence of the Gassum Formation at depths of more than 3000 m. The Haldager Sand and the Frederikshavn Member are found within the depth interval in question. Both members are evaluated to be of moderate value for geothermal exploration, as the Haldager Sand is thin and the Frederikshavn Member has a high clay content. Regarding reservoir properties the region is not homogeneous, but must be described in three sub-regions.

In the northeastern part, both members may have good reservoir characteristics. Centrally in this sub-region, the Haldager Sand is situated below 3000 m, and the net sand thickness of the Frederikshavn Member is unknown but probably small.

In the northwestern part, the Frederikshavn Member may be dominated by clay, whereas the Haldager Sand can be of extraordinary thickness in the rim synclines of the salt structures.

In the southwestern part, the Haldager Sand is indicated to have good reservoir properties, but is generally thin. Seismic data show considerable thickening of the sequence in some rim synclines.

Area F comprises regions with basement at shallow depths – the Ringkøbing-Fyn High and the Fennoscandian Border Zone.

However, along the flanks of the High, Palaeozoic

series with poor geothermal reservoir properties are present.

The above described subdivision of the Danish on-shore region is a generalized review based on the distribution of known geothermal reservoir parameters. It is carried out to give a picture of the potential geothermal reservoirs as these can be evaluated on the basis of the present well data and seismic data.

Area A is the most well known and is regarded as a positive region for geothermal exploration. Areas B and C may turn out to be positive in the same sense, but supplementary well data and seismic data are necessary for reliable evaluation.

Evaluation of the reserves

On the basis of the geological and geophysical studies, an evaluation of the geothermal reserves in Denmark was carried out. The purpose of the appraisal is to determine how large a portion of the estimated resources can be utilized from an energy standpoint. No comprehensive consideration was given to economic and marketing aspects in this study; however, it was unavoidable that a simple economic analysis be brought into the assessment.

In the evaluation, areas A, B, and C are judged to be geothermically the most positive regions. Even though areas B and C are expected to have positive reservoir characteristics in only limited areas, in the appraisal they are taken in their full extension. On the other hand, areas D, E, and F are mainly not included, even though there can be good reservoir characteristics locally. Area C is divided into two sub-regions here, C1 and C2. In the assessment, the region is thus divided into four parts: A, B, C1, and C2, as is shown in fig. 45.

The reservoir characteristics are assumed to be constant within each of the regions. The applied values are tabulated in table 4. Because of the great uncertainty about transmissivity, two (equally probable) values for brine-permeability are given.

The assessment is undertaken partly to determine the total energy content of the reservoirs, and partly to calculate the extent to which the available energy can be utilized, assuming that extraction takes place with the aid of single plants with one production and one injection well. It is furthermore presumed that the energy is applied to district heating, where the temperature conversion between the geothermal and district heating cycle takes place by means of heat pumps.

The plant-lifetime is set at 25 years, and the

district heating power for a single plant is determined as the economically optimized value worked out from a simple economic analysis.

In order to investigate the influence of the magnitudes of the input parameters in the calculations, a sensitivity analysis is taken for a single case. From this it is found that the magnitude of the reservoir transmissivity and of the economic data have practically no influence on the size of the net recovery factor; i.e., the net amount of the total energy content that can be utilized, when consideration is given to the energy consumed in the pump apparatus, etc., in order to extract and apply the geothermal energy. On the other hand, the study makes it clear that transmissivity greatly influences the economic relationships. Furthermore, the study shows that the recovery factor increases with the temperature of the reservoir, whereas a high district-heat temperature level has the opposite effect. The assessment results in a net recovery factor of approximately 14%.

The most important of the computed results are summarized in appendix 3. The results for the four areas, and the total region, are tabulated here for two different transmissivity and district heating temperature levels.

When the results are summed up, the appraisal gives total gross and net power values of approximately 150 and 60 GW, respectively. In other words, if the total investigated regions are utilized, they will be able to deliver a district heating power of 150 GW for a 25-years period by means of the geothermal net power of approximately 60 GW, and fossil fuel power of approximately 90 GW.

As current power consumption for space heating for the entire country is approximately 10 GW, it is clear that we are speaking here of quite significant reserves.

The power factor – that is, the ratio between district heating- and fossil fuel power – is found to be 1.7. As the power factor for a conventional district heating plant is approximately 0.85, it can be concluded that in the regions where it is geologically, technically, and economically possible to apply geothermal energy instead, fuel consumption can be reduced by approximately half.

As the collectively investigated regional area is approximately 19,000 km², an average gross power density of approximately 8 MW/km² is found, together with a net power density of approximately 3 MW/km².

While the values for the gross and net power densities found in the study vary by up to a factor of three, the calculated values for the power factor and net recovery factor remain essentially constant.

It is apparent from the study that the most favourable region is area B, when market conditions are not taken into consideration. As geological knowledge of this region is presently very limited, it is necessary with further geological investigations to be conducted in this region.

Litteratur

- Baartman, J. C. 1976: Structural outline of Denmark (Pre Permian). – In: Rasmussen, L. B. 1978: Geological aspects of the Danish North Sea Sector. – Danm. geol. Unders., III række, 44, 85 p.
- Baartman, J. C. & Christensen, O. B. 1975: Contributions to the interpretation of the Fennoscandian Border Zone. – Danm. geol. Unders., II række, 102, 47 p.
- Balling, N. 1976: Geothermal models of the Crust and Uppermost Mantle of the Fennoscandian Shield in South Norway and the Danish Embayment. – J. Geophys., 42, pp. 237–256.
- Balling, N. 1976: Rapport over geotermiske energiundersøgelser i dybdeboringen Odde Sund 1. – Laboratoriet for Geofysik, Aarhus Universitet, okt. 1976. (Optaget som Bilag 3.1 i Handelsministeriet 1977).
- Balling, N. 1978: Geofysiske metoder til lokalisering af geotermiske energiressourcer. – Dansk geol. Foren. Årsskrift 1977, pp. 13–27.
- Balling, N. 1979: Subsurface temperatures and heat flow estimates in Denmark. – In: Cermák & Rybach (eds.), Terrestrial heat flow in Europe, Springer Verlag, Berlin, pp. 161–171.
- Balling, N. & Madsen, L. 1978: Temperature Data and Isothermal Maps of Denmark. – EC Geothermal Report.
- Balling, N. & Saxov, S. 1978: Low enthalpy geothermal energy resources in Denmark. – Pageoph 117, pp. 205–212.
- Balling, N. & Saxov, S. 1979: Determination of Heat Flow, Temperature Distribution, Heat Productivity and Heat Production in Denmark. – EC second meeting on Heat Flow and Temperature Determinations, Brussels.
- Balling, N., Kristiansen, J. I., Poulsen, K. D. & Saxov, S. 1980: Geothermal trends of Denmark. – EC second International Seminar, Strasbourg.
- Bertelsen, F. 1977: Trias lagserien i Det dansk-norske Bassin. Stratigrafisk inddeling og beskrivelse af Hyllebjerget, Kvols, Skive, Rødding, Odde Sund – Danm. geol. Unders., Nord-Projekt, Rapport 4, 18 p.
- Bertelsen, F. 1977: Trias lagserien i Det dansk-norske Bassin. Lithologisk beskrivelse og lithostratigrafisk inddeling af trias i Mors, samt korrelation mellem Mors-1, Gassum-1, Rønde-1. – Danm. geol. Unders., Nord-Projekt, Rapport 6, 9 p.
- Bertelsen, F. 1978: The Upper Triassic-Lower Jurassic Vinding and Gassum Formations of the Norwegian-Danish Basin. – Danm. geol. Unders., Ser. B, 3, 32 p.
- Bertelsen, F. 1978: Triassic Well Data Sheets (reviderede lithostratigrafiske inddelinger). – Danm. geol. Unders., unpubl. rapport, 17 p.
- Bertelsen, F. 1980: Lithostratigraphy and depositional history of the Danish Triassic. – Danm. geol. Unders., Ser. B, 4, 59 p.
- Bertelsen, F., Just, N., Michelsen, O., Jacobsen, J., Laier, T. & Gosk, E. 1978: Mapping of Danish permeable and impermeable formations. – Geologisk – Geokemisk – Hydrologisk. – Upubl. EF-rapport. Danm. geol. Unders., 13 p.

- Bertelsen, F. & Priisholm, S. 1978: Memorandum on the Triassic Series of the Central Part of the Danish Subbasin. – Danm. geol. Unders., confidential report, 7 p.
- Christensen, O. B. 1971: Upper Silurian of the boring Nøvling No. 1 in Central Jylland. – Danm. geol. Unders., Rapp. 7, 24 p.
- Clark, C. N. & Tallbacka, L. (1980): The Zechstein deposits of southern Denmark. – *Contr. Sedimentology*, 9, pp. 205–231.
- Danm. geol. Unders. 1977: Temperature measurements in exploration wells. – Danm. geol. Unders., upubl. rapport, 54 p.
- Danm. geol. Unders., Prækvartærafdelingen 1976: Geologisk vurdering af geotermisk energi i Danmark. – Danm. geol. Unders., upubl. rapport til Handelsministeriet, 73 p.
- Gosk, E., Holm, L. & Priisholm, S. 1979: Varmt porevand. – *Varv* 1979, 3, pp. 74–80.
- Gosk, E. & Jensen, P. K. 1980: "Hot dry rock" – en potentiel energikilde? – *Dansk geol. Foren. Årsskrift* 1979, pp. 99–103.
- Haenel, R. (chief editor) 1980: Atlas of Subsurface Temperatures in the European Community. – Luxembourg.
- Handelsministeriet 1977: Udnyttelse af geotermisk energi i Danmark. – Rapport fra Handelsministeriets arbejdsgruppe vedr. geotermisk energi, 72 p.
- Hansen, J. M. & Håkansson, E. 1980: Thistedstrukturens geologi – et "Neotektonisk" skoleeksempel. – *Dansk geol. Foren. Årsskrift* 1979, pp. 1–9.
- Holm, L. 1978: Supplerende lithologisk beskrivelse af sandstenskerner. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport.
- Holm, L. 1978: The grain size distribution in the sandstone. – Cores from the Gassum Formation, Gassum No. 1. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport.
- Holm, L. & Priisholm, S. 1978: Porosity and permeability analysis of sandstone cores from the Gassum Formation, Upper Triassic, in the Gassum 1 well. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport, 16 p.
- Jacobsen, J. & Laier, T. 1978: Chemical analysis of brines from Danish boreholes. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport, 3 p.
- Kristiansen, J. I. 1978: Teoretisk analyse af metoder til bestemmelse af varmeledningsevne for geologiske materialer og eksempler på anvendelse. – Upubl. specialeopgave, Lab. for Geofysik, Aarhus Universitet, 129 p.
- Larsen, G. 1966: Rhaetic-Jurassic-Lower Cretaceous sediments in the Danish Embayment. – Danm. geol. Unders., II række, 91, 127 p.
- Larsen, G. & Friis, H. 1975: Triassic heavy-mineral associations in Denmark. – Danm. geol. Unders., Årbog 1974, pp. 33–47.
- Larsen, O. 1971: K/Ar age determinations from the Precambrian of Denmark. – Danm. geol. Unders., II række, 97, 37 p.
- Madirazza, I. 1977: Zechstein Bassinet og saltstrukturer i Nordjylland. – *Dansk geol. Foren. Årsskrift* 1976, pp. 57–68.
- Madsen, L. 1975: Approximate geothermal gradients in Denmark and the Danish North Sea Sector. – Danm. geol. Unders., Årbog 1974, pp. 5–16.
- Madsen, L. 1978: Geotermisk energi i Danmark – en geologisk vurdering. – *Dansk geol. Foren. Årsskrift* 1977, pp. 29–40.
- Madsen, L. 1978: Notat vedr. seismiske forundersøgelser i forbindelse med forsøgsindvinding af geotermal vand. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport, 7 p.
- Michelsen, O. 1971: Lower Carboniferous foraminiferal faunas of the boring Ørslev No. 1. – Danm. geol. Unders., II række, 98, 86 p.
- Michelsen, O. 1976: Jura lagserien i Det dansk-norske Bassin. Revideret lithostratigrafi. Bassinudvikling. Stratigrafisk inddeling af Hyllebjerg, Kvols, Skive, Rødding, Oddesund. – Danm. geol. Unders., Nord-projekt, upubl. rapport 1, 43 p.
- Michelsen, O. 1976: Kortfattet oversigt over de geologiske forhold i den danske del af Nordsøen. – Danm. geol. Unders., Årbog 1975, pp. 117–132.
- Michelsen, O. 1976: Preliminary report on the Jurassic lithostratigraphic nomenclature in the Danish North Sea Area. – Danm. geol. Unders., Årbog 1975, pp. 105–116.
- Michelsen, O. 1978: Stratigraphy and distribution of Jurassic deposits of the Norwegian Danish Basin. – Danm. geol. Unders., Ser. B, 2, 28 p.
- Michelsen, O. 1979: Report on the Jurassic of the Hobro No. 1 and Voldum No. 1 borings, Denmark. – Danm. geol. Unders., Årbog 1978, pp. 141–150.
- Michelsen, O. & Andersen, C. (1980): Review of Danish regional geology and tectonics. – *Zeitschrift für angewandte Geologie*. In press.
- Michelsen, O. & Bertelsen, F. 1979: Den varme undergrund. Geotermiske reservoirformationer i Danmark. – *Varv* 1979, 2, pp. 41–49.
- Michelsen, O. & Bertelsen, F. 1979: Geotermiske reservoirformationer i den danske lagserie. – Danm. geol. Unders., Årbog 1978, pp. 151–164.
- Michelsen, O., Bertelsen, F., Priisholm, S., Holm, L., Gosk, E. & Laier, T. 1978: Geotermisk Energi i Danmark? – *Varv* 1978, 4, pp. 105–115.
- Nygaard, E. 1980: Zechstein carbonatbjergarterne syd for Ringkøbing-Fyn Højderyggen i Jylland. – Danm. geol. Unders., Upubl. rapport, 9 p.
- Poulsen, Chr. 1967: The Lower Cambrian from Slagelse No. 1, Western Sealand. – Danm. geol. Unders., II række, 93, 27 p.
- Poulsen, Chr. 1974: Further contributions to the knowledge of the Palaeozoic of Slagelse No. 1, Western Sealand. – Danm. geol. Unders., II række, 101, 42 p.
- Poulsen, K. D. 1979: Varmeledningsevne for porøse geologiske materialer med speciel henblik på kalksten. – Upubl. specialeopgave, Lab. for Geofysik, Aarhus Univ., 123 p.
- Priisholm, S. 1976: Lithologisk beskrivelse og tolkning af jurallagserien i borerne Oddesund, Rødding, Skive, Kvols, Hyllebjerg. – Danm. geol. Unders. Nord-projekt. Upubl. rapport 2, 8 p.
- Priisholm, S. 1976: Log-korrelation og lithologisk beskrivelse af lithostratigrafiske enheder i nedre kridt. Oddesund, Rødding, Skive, Kvols, Hyllebjerg. – Danm. geol. Unders., Nord-Projekt. Upubl. rapport 3, 5 p.
- Priisholm, S. 1978: Reservoir parameters of the Haldager Sand Member, Haldager Formation, in the wells Hyllebjerg 1, Skive 1, Hobro 1. – Danm. geol. Unders., confidential report.
- Priisholm, S. & Michelsen, O. 1978: The use of porosity logs in lithology determination, lithostratigraphy and basin analysis. – Danm. geol. Unders., Årbog 1977, pp. 89–100.
- Radwanski, A. 1975: Det Dansk-Polske Trug – Dets geotektoniske baggrund, sedimentationshistorie og senere tektonik. – *Dansk geol. Foren. Årsskrift* 1974, pp. 39–41.
- Rasmussen, L. B., Baartman, J. C., Henriksen, S. E., Kristoffersen, F. N., Dinesen, A., Bang, I., Stenestad, E., Buch, A., Christensen, O. B., Michelsen, O., Hansen, T. J. & Jacobsen, F. L. 1973: Dydboringen Nøvling Nr. 1 i Midtjylland. Resultaterne af de geologiske undersøgelser. – Danm. geol. Unders., III række, 40, 164 p.
- Rasmussen, L. B., Dinesen, A., Henriksen, S. E., Bang, I., Stenestad, E., Buch, A., Christensen, O. B., Michelsen, O. & Jacobsen, F. L. 1971: Dydboringen Rønde Nr. 1 på Djursland. Resultaterne af de geologiske undersøgelser. – Danm. geol. Unders., III række, 39, 123 p.
- Richardson, S. W. & Oxburgh, E. R. 1979: The heat flow field in mainland UK. – *Nature* 282, pp. 565–567.

- Saxov, S. 1977: Review of temperature and heat flux in Denmark. – EC Seminar on geothermal energy, Brussels, Dec. 1977, pp. 79–97.
- Saxov, S. (ed.) 1979: Compilation of temperature, geological, hydrogeological and geochemical data in Denmark. – A first stage survey at the geothermal potential. – EUR 6384 EN (MF), Luxembourg.
- Saxov, S. 1980: Geotermisk energi, Symposium om Danmarks energiproblemer 1979. – Samfundsvidenskabeligt forlag, pp. 187–194.
- Saxov, S., Balling, N., Breiner, N., Kristiansen, J. I. & Poulsen, K. D. 1978: Geothermal Conductivity Equipment: Measurements in Situ and in the Laboratory. – Nordic Symposium on Geothermal Energy, Göteborg, pp. 142–150.
- Skjerna, A. G. 1979: Numerisk løsning af varmeledningsligningen med materialetransport ved hjælp af en pseudo-spektral metode. – Upubl. specialeopgave, Lab. for Geofysik, Aarhus Universitet, 135 p.
- Sorgenfrei, T. 1966: Strukturgeologischer Bau von Dänemark. – Z. Geol. 15, pp. 641–660.
- Sorgenfrei, T. & Buch, A. 1964: Deep Tests in Denmark 1935–1959. – Danm. geol. Unders., III række, 36, 146 p.

Appendix 1

Tabel over dybder, tykkelser, porøsiteter og permeabiliteter.

Table of depths, thicknesses, porosities, and permeabilities.

Generelle bemærkninger

Dybder og tykkelser er baseret på petrofysiske borehulsmålinger – logs.

+ efter tykkelse eller net sand betyder, at lagserien ikke er gennemboret.

A lagserien er klassificeret som Skagerrak Formation (Bertelsen 1980), men medregnes her, ud fra reservoirkaraktererne, til Bunter Sandsten Formation eller Gassum Formationen, respektivt.

' Ringe Beds, medregnes her til Tønder Formationen.

” net sand tykkelsen inkluderer Ørslev Formationens sandlag.

⊕ net sand tykkelsen inkluderer Falster Formationens sandlag.

? angivelse behæftet med væsentlig usikkerhed.

S porøsitet baseret på SP-log. Usikker, ofte for høj.

F porøsitet baseret på FDC-log.

N porøsitet baseret på CNL-log.

I Porøsitet baseret på ITT-log. Behæftet med nogen usikkerhed.

C porøsitet, målt på et begrænset kernemateriale.

G luftpermeabilitet, målt på et begrænset kernemateriale.

L væskepermeabilitet, målt på et begrænset kernemateriale.

PALÆOZOIKUM

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
<i>Zechstein 3 kalksten</i>						
Arnum 1	1711–1761	1742	39		C-8	G-0,1
Hønning 1	2103–2148	2126	45		C-2	G-0,3
Tønder 1	2387–2393	2390	6			
Tønder 2	2655–2660	2567	4		C-19	G-1,5
Åbenrå 1	1930–2057	1955	27		C-6	G-0,02
<i>Zechstein 2 kalksten</i>						
Hønning 1	2248–2254	2251	6			
Tønder 1	3084–3111	3097	27		C-3	G-1
Tønder 2	2981–3009	2995	28		C-3	G-0,1
Åbenrå 1	2041–2071	2067	30		C-15	G-0,2
<i>Zechstein 1 øvre kalksten</i>						
Hønning 1	2330–2374	2332	44		C-16	G-4
Tønder 2	3038–3043	3040	5		C-22	G-440
Åbenrå 1	2151–2183	2178	32		C-8	G-1
<i>Zechstein 1 nedre kalksten</i>						
Hønning 1	2422–2444	2433	22		C-15	G-2
Tønder 2	3051–3070	3060	19		C-7	G-0,8
Åbenrå 1	2238–2280	2270	42		C-15	G-10
<i>Rotliegendes sandsten</i>						
Ringe 1	1194–1363+	1279+	169+	100	C-10	G-4
Rødby 2	2674–2860	2767	186		C-7	G-5
Rønde 1	4822–4919	4871	97			
Tønder 2	3071–3200+	3133+	124+		C-9	G-4
Ørslev 1	1803–2028	1916	225	50	F/I-17	
<i>Karbon kalksten</i>						
Ørslev 1	2028–2551+	2290+	523+		F/I-8	
<i>Kambrisk kvartsitisk sandsten</i>						
Slagelse 1	2928–2934+	2931+	6+	6+	C-4	G-3

BUNTER SANDSTEN FORMATION

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
Arnum 1	1377-1502	1440	125	9	S-16, C-31	G-100
Børglum 1						
Fjerritslev 1						
Fjerritslev 2						
Flybjerg 1						
Frederikshavn 1	971-1277*	1124	306	50?		S-17
Frederikshavn 2	948-1064*	1006	116+			
Frederikshavn 3	924-998*	961	74+			
Gassum 1	2689-3383	3036	694	690, 736''	C-15	G-100
Glamsbjerg 1						
Grindsted 1	1401-1458	1430	57	40	I-28	
Haldager 1						
Harte 1						
Hobro 1						
Horsens 1						
Hyllebjerg 1						
Hønning 1	1560-1743	1653	183	40	S-27/C-29	G-1500
Kvols 1						
Lavø 1						
Linde 1						
Mors 1	4367-5303	4835	936+	750, 900''	F-0, I-6, C-7	G-10
Nøvling 1	3126-3171	3149	45	0?		
Oddesund 1						
Ringe 1	1063-1075	1069	12			
Rødby 1	1125-1382	1254	256	45	S-38, C-24	G-75
Rødby 2	1096-1337	1217	240			
Rødning 1						
Rødekro 1	1331-1410	1371	79	19	S-33	
Rønede 1	4013-4591	4302	578	280, 330''	F/I-8	
Skagen 1						
Skagen 2	563-619*	591	55+			
Skive 1						
Slagelse 1	1824-2016	1920	192	74	N-35?	
Thisted 1						
Tønder 1	1606-1808	1707	203	35		
Tønder 2	1924-2100	2012	176			
Uglev 1						
Ullerslev 1						
Vedsted 1						
Vemb 1						
Vinding 1						
Voldum 1						
Ørslev 1	1064-1181	1123	117	19	F/N-25	
Åbenrå 1	1467-1579	1523	112			

TØNDER FORMATION

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
Arnum 1	953–1103	1028	150	22	S–41	
Børglum 1						
Fjerritslev 1						
Fjerritslev 2						
Flyvbjerg 1						
Frederikshavn 1						
Frederikshavn 2						
Frederikshavn 3						
Gassum 1	2022–2263	2143	241	24	C–28	G–1000
Glamsbjerg 1						
Grindsted 1	1007–1176	1092	169	34	>I–40	
Haldager 1						
Harte 1						
Hobro 1						
Horsens 1						
Hyllebjerg 1						
Hønning 1	1092–1261	1177	169	33	S–31	
Kvols 1						
Lavø 1						
Linde 1						
Mors 1	3480–3719	3600	238	85, 170 [⊕]	F–11	
Nøvling 1	2661–2969	2815	308			
Oddesund 1						
Ringe 1						
Rødby 1						
Rødby 2						
Rødning 1						
Rødekro 1	1025–1139	1082	114	25	S–45	
Rønde 1	3415–3656	3536	241	100	F–10	
Skagen 1						
Skagen 2						
Skive 1						
Slagelse 1	1297–1590'	1444	293	20?		
Thisted 1						
Tønder 1	1050–1255	1153	204	21	S–33, C–40	
Tønder 2	1326–1581	1454	255	12	S–30	
Uglev 1						
Ullerslev 1						
Vedsted 1						
Vemb 1						
Vinding 1	1921–2105?	2013?	184?			
Voldum 1						
Ørslev 1						
Åbenrå 1	1041–1179	1110	138			

GASSUM FORMATION

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
Arnum 1						
Børglum 1	1349–1504	1427	155	48	S–40, C–34	G–1500, L–250
Fjerritslev 1						
Fjerritslev 2	2225–2321	2273	96?		C–16	G–25
Flyvbjerg 1	1261–1457	1359	196	79, 136	S–36, S–35	
Frederikshavn 1	893–971	932	77	24	S–17	
Frederikshavn 2	869–948	909	78		C–35	G–20
Frederikshavn 3	860–924	892	64			
Gassum 1	1460–1590	1525	130	53	C–26	G–2000, L–300
Glamsbjerg 1						
Grindsted						
Haldager 1						
Harte 1						
Hobro 1	2343–2489	2416	146	55	F/I–15	
Horsens 1	1449–1543	1496	94	24	S–31, C–25	G–500
Hyllbjerg 1	2554–2723	2639	169	71	F/N–20	
Hønning 1						
Kvols 1	2405–2514	2460	109	36	F/N–21	
Lavø 1	2105–2340	2223	235	87, 99	S–18, C–10	
Linde 1						
Mors 1	2750–2917	2834	166	30	F–16	
Nøvling 1	1778–1863	1821	85			
Oddesund 1	1895–1992	1943	97	17	F/N–24	
Ringe 1						
Rødby 1	467–683	575	217	71	S–43	
Rødby 2	445–665	555	220	47	S–37	
Rødving 1	1916–2011	1964	95	29	F/N–27	
Røde kro 1						
Rønne 1	2571–2711	2641	139	29	F–13	
Skagen 1						
Skagen 2	552–563	558	11		C–35	G–100
Skive 1	2093–2212	2153	119	51	F/N–25	
Slagelse 1	1109–1246	1178	137	42	N–35?	
Thisted 1	710–835	773	125	39	F–32	
Tønder 1						
Tønder 2	1070–1103	1087	33	12	S–29	
Uglev 1						
Ullerslev 1	817–916	867	99	55	S–34	
Vedsted 1	1892–2032	1962	140	103	S–20, C–24	G–1000, L–200
Vemb 1	1779–1837	1808	58	14	S–17	
Vinding 1	1539–1591	1565	51			
Voldum 1	1722–1850	1786	129	30	F–15	
Ørslev 1	500–721	611	221	74	F/N–33	
Åbenrå 1						

HALDAGER SAND

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
Arnum 1						
Børglum 1	1024–1053	1039	29	18	S–31	
Fjerritslev 1						
Fjerritslev 2	1280–1314	1297	35	15	S–16	
Flyvbjerg 1	944–998	971	54	40	S–31	
Frederikshavn 1	689–724	707	35	16	S–13	
Frederikshavn 2	650–696	673	46			
Frederikshavn 3						
Gassum 1						
Glamsbjerg 1						
Grindsted 1						
Haldagaer 1	1120–1275	1198	154	88	S–24	
Harte 1						
Hobro 1	1852–1891	1872	39	20	F–22	
Horsens 1	1235–1239	1237	4	5	S–24	
Hyllebjerg 1	1885–1894	1890	9	8	F/N–28	
Hønning 1						
Kvols 1	1940–1955	1948	15	7	F/N–25	
Lavø 1						
Linde 1						
Mors 1	2015–2137	2076	122	44	F/I–19	
Nøvling 1						
Oddesund 1	1604–1608	1606	4	3	F/N–28	
Ringe 1						
Rødby 1						
Rødby 2						
Rødning 1						
Rødekro 1						
Rønde 1			0			
Skagen 1						
Skagen 2	429–443	436	14	5	S–31	
Skive 1	1690–1702	1696	12	10	F/N–32	
Slagelse 1						
Thisted 1	569–600	585	31	13	F–33	
Tønder 1						
Tønder 2						
Uglev 1	873–910	892	37	18	S–42, C–28	G–600
Ullerslev 1						
Vedsted 1	1144–1219	1182	75	55	S–36, C–33	G–2000
Vemb 1	1566–1575	1571	9	8	S–20	
Vinding 1						
Voldum 1	1358–1388	1373	30	5	F–12	
Ørslev 1						
Åbenrå 1						

FREDERIKSHAVN MEMBER

Boring	Dybde u. havniveau meter	Midt dybde meter	Tykkelse meter	Net sand meter	Porøsitet %	Permeabilitet mD
Arnum 1						
Børglum 1	733-957	845	224	67	S-31, C-25	
Fjerritslev 1						
Fjerritslev 2	1001-1143	1072	142	0	0	
Flyvbjerg 1	703-875	789	172	70	S-26, C-40	
Frederikshavn 1	495-629	562	134			
Frederikshavn 2	462-593	528	131			
Frederikshavn 3						
Gassum 1	1020-1121	1071	101	24	S-17, C-30	G-400
Glamsbjerg 1						
Grindsted 1						
Haldager 1	780-1023	902	243	21?	C-30	G-1000
Harte 1						
Hobro 1	1741-1823	1782	82	11	F/I-15	
Horsens 1	1168-1230	1199	62	36	S-33	
Hyllebjerg 1	1663-1810	1737	147	20	F/N-29	
Hønning 1						
Kvols 1	1856-1912	1884	56	5	F/N-29	
Lavø 1						
Linde 1	1097-1128	1113	31	4	F/N-26	
Mors 1	1731-1868	1800	137	36	I-25	
Nøvling 1	1325-1425	1375	100	0?		
Oddesund 1	1487-1556	1522	69	10	F/N-28	
Ringe 1						
Rødby 1						
Rødby 2						
Rødding 1						
Rødekro 1						
Rønede 1	2008-2058	2033	50	18	F/I-20	
Skagen 1						
Skagen 2	193-385	289	192	71	S-39	
Skive 1	1559-1629	1594	70	4	F/N-25	
Slagelse 1						
Thisted 1	?					
Tønder 1						
Tønder 2						
Uglev 1	?					
Ullerslev 1						
Vedsted 1	836-1071	954	235	19	S-35	
Vemb 1	?					
Vinding 1						
Voldum 1	1278-1344	1311	66	32	F-17	
Ørslev 1						
Åbenrå 1						

Appendix 2

Tabel og figurer over varmeledningsevne og varmeproduktion.

Table and figures of thermal conductivity and heat production.

Varmeledningsevne

K angiver varmeledningsevnen for vandmættet materiale bestemt på grundlag af målinger. K_s er den beregnede værdi for materialets faste partikler bestemt via K og den målte porøsitet \varnothing .
(Tallene i parentes angiver værdier målt på cuttings).

Formation eller tidsafsnit	Member eller tidsafsnit	Boring	Bjergart	\varnothing	K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	K_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Tertiær	n. eocæn	Tinglev 1	siltsten	0.42	1.52	2.93
-	paleocæn	Tinglev 1	lersten	0.43	1.60	3.30
-	n. oligocæn	Viborg 5	ler	0.49	1.39	3.09
-	n. eocæn	-	-	0.50	1.40	3.26
-	ø. paleocæn	-	-	0.51	1.34	3.04
-	m. paleocæn	-	-	0.47	1.40	2.97
-	paleocæn	Viborg 1	-	0.46	1.56	3.47
-	-	Vinding 1	sand	0.45	1.71	4.00
-	-	-	lerskifer (sand)	0.56	1.41	4.07
-	ø. oligocæn	-	sand	0.45	1.74	4.16
-	m. oligocæn	-	ler	0.53	1.48	4.09
-	n. eocæn	-	lersten	0.59	1.46	5.07
-	paleocæn	-	lerskifer	0.55	1.20	2.79
Ø. Kridt	maastr.-campanien	Gassum 1	skrivekridt	0.36	1.70	3.01
-	-	-	-	0.34	1.80	3.17
-	-	-	-	0.33	1.86	3.25
-	-	-	-	0.33	1.84	3.18
-	-	-	-	0.32	1.78	2.96
-	-	-	-	0.32	1.85	3.14
-	-	-	-	0.31	1.90	3.14
-	campanien	Gassum 1	skrivekridt	0.22	2.07	2.96
-	santonien	-	-	0.18	2.21	2.94
-	-	-	-	0.16	2.37	3.07
-	-	-	-	0.16	2.41	3.11
-	-	-	kalksten	0.16	2.08	2.63
-	-	-	-	0.16	2.12	2.68
-	maastr.-coniacien	Horsens 1	-	0.14	2.53	3.22
-	coniacien	Lavø 1	-	0.10	2.60	3.03
-	-	-	-	0.07	2.70	3.02
-	turonien	-	-	0.05	2.69	2.93
-	maastr.-campanien	Rønnebjerg 1	skrivekridt	0.42	1.55	3.08
-	-	-	-	0.41	1.57	3.00
-	-	-	-	0.35	1.67	2.85
-	campanien	-	-	0.35	1.63	2.78
-	-	-	-	0.31	1.91	3.21

Formation eller tidsafsnit	Member eller tidsafsnit	Boring	Bjergart	Ø	K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	K _s (W m ⁻¹ K ⁻¹)
-	-	-	-	0.40	1.61	3.04
-	-	-	-	0.35	1.61	2.70
-	-	-	-	0.35	1.75	3.05
-	-	-	-	0.38	1.60	2.92
-	-	-	-	0.33	1.80	3.04
-	-	-	-	0.32	1.85	3.10
-	santonien	-	kalksten	0.22	2.21	3.15
-	-	-	-	0.21	2.34	3.32
-	-	-	-	0.20	2.27	3.16
-	santonien	Rønnebjerg 1	kalksten	0.21	2.31	3.27
-	cenomanien	-	skifer (kalk)	0.18	2.31	3.09
-	turonien	Rønnebjerg 2	mergelsten	0.33	1.76	2.99
-	maastr.-campanien	Svenstrup 1	skrivekridt	0.46	1.45	3.01
-	-	-	-	0.42	1.52	2.95
-	santonien	-	kalksten	0.25	2.11	3.20
-	-	Vemb 1	skrivekridt	0.43	1.57	3.27
-	danien	Vinding 1	-	0.37	1.75	3.27
-	santonien	-	-	0.22	2.24	3.20
-	-	-	-	0.15	2.62	3.36
-	cenomanien	Haldager 1	mergelsten	0.22	2.25	3.24
-	santonien	Uglev 1	kalksten	0.17	2.22	2.90
-	-	-	-	0.16	2.35	3.03
N. kridt		Arnum 1	finsandsten	0.35	2.06	3.96
-		Børglum 1	lersten	0.42	2.57	7.21
-		-	-	0.42	2.14	5.24
-		-	finsand (ler)	0.43	2.21	5.75
-		-	-	0.34	2.47	5.12
-		Fjerritslev 2	lersten	0.48	1.37	2.91
-		Gassum 1	lerskifer	(0.55)	(1.25)	3.08
-		Haldager 1	lersten (silt)	0.45	1.50	3.08
-		-	-	0.47	1.42	3.06
-		-	-	0.32	1.34	1.95
-		Lavø 1	finsandsten	0.07	2.73	3.05
-		-	sandsten	0.17	3.61	5.19
-		-	-	0.23	3.66	6.16
-		Rødby 1	ler	0.51	1.23	2.57
-		Rønnebjerg 1	lerskifer	0.35	1.67	2.87
-		-	lerskifer (sand)	0.48	1.56	3.68
-		Uglev 1	lersten	0.43	1.85	4.21
-		-	-	0.55	1.73	6.23
-		Vedsted 1	-	0.45	1.81	4.44
-		Vinding 1	ler	0.23	2.06	2.99
-		-	sandsten	0.32	2.62	5.14
Bream	Frederikshavn	Børglum 1	sandsten	0.35	3.94	7.36
-	-	-	siltsten	0.26	1.94	2.92
-	-	Fjerritslev 1	lersten	0.11	2.08	2.42
-	-	- 2	finsandsten (ler)	0.20	2.47	3.51
-	-	Gassum 1	sandsten	0.23	2.90	4.62
-	-	-	-	0.40	2.32	5.58
-	-	-	-	0.12	3.13	3.89
-	-	-	-	0.05	4.13	4.61
-	-	-	-	0.06	4.20	4.70
-	-	-	-	0.28	3.12	4.82
-	-	-	-	0.38	2.43	5.71
-	-	Haldager 1	lersten (silt)	0.33	1.87	3.27
-	-	-	-	0.35	1.55	2.55
-	-	Haldager 1	lerskifer	(0.57)	(1.25)	3.17
-	-	-	-	(0.54)	(1.34)	3.35

Formation eller tidsafsnit	Member eller tidsafsnit	Boring	Bjergart	Ø	K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	K _s (W m ⁻¹ K ⁻¹)
-	-	-	finsandst. (ler)	0.18	3.36	4.90
-	-	-	-	0.40	2.20	5.18
-	-	-	sandsten	0.26	3.54	6.55
-	-	-	-	(0.48)	(1.83)	5.05
-	-	-	siltsten (ler)	(0.48)	(1.50)	3.46
-	-	-	sandsten	0.42	2.08	5.13
-	?	Vinding 1	lerskifer	0.44	1.71	3.90
Bream	Børglum	Gassum 1	lerskifer	0.29	2.33	4.02
Haldager	Flyvbjerg	Haldager 1	lersten (sand)	0.15	2.96	3.88
-	-	Fjerritslev 2	lerskifer (sand)	0.43	2.07	5.22
-	-	Vedsted 1	finsandsten	0.32	2.80	5.76
Haldager	Haldager sand	Vedsted 1	sandsten	0.29	3.60	7.46
Fjerritslev	F-III	Børglum 1	Sandsten (silt)	0.32	2.73	5.55
-	-	Børglum 1	lersten	0.25	1.82	2.64
-	F-I	-	lerskifer (sand)	0.24	2.65	4.22
-	F-III	Fjerritslev 1	-	0.49	1.86	5.34
-	F-I	Fjerritslev 2	finsandsten	0.14	4.40	5.99
-	-	Gassum 1	lerskifer	0.60	1.14	2.96
-	-	-	lerjernsten	0.09	1.82	2.01
-	-	-	lerskifer	0.07	3.39	3.89
-	-	-	lerjernsten	0.05	1.75	1.86
-	-	-	lerskifer	0.16	3.23	4.49
-	F-IV	Haldager 1	-	0.29	1.56	2.27
-	-	-	lerjernsten	0.14	2.53	3.20
-	F-I	Horsens 1	lerskifer (sand)	0.25	3.01	5.14
-	F-IV	Vedsted 1	lersten (sand)	0.33	2.35	5.53
-	F-III	Vedsted 1	lerskifer	0.28	2.53	4.41
-	F-I	-	-	0.18	2.78	3.81
Gassum	-	Børglum 1	sandsten	0.30	3.10	6.14
-	-	-	-	0.31	3.31	6.98
-	-	-	-	0.31	3.29	7.05
-	-	Fjerritslev 2	lerskifer (sand)	0.07	3.44	3.92
-	G-3	Gassum 1	lerskifer	0.21	1.25	1.50
-	-	-	sandsten	0.31	2.94	6.00
-	-	-	-	0.28	3.11	5.89
-	G-3/ G-2	-	-	0.35	2.52	5.34
-	G-1	-	lerskifer	0.30	1.76	2.75
-	G-1	-	sandsten	0.21	2.94	4.42
-	-	-	-	0.30	2.43	4.44
-	-	-	-	0.29	2.61	4.72
-	-	-	-	0.18	3.12	4.46
-	-	-	-	0.29	2.44	4.26
-	-	Lavø 1	finsandsten	0.10	3.51	4.23
-	-	-	lerskifer	0.06	2.78	3.07
-	-	Rødby 1	lersten/finsand	0.47	1.83	4.89
-	-	-	lersten	0.40	1.54	2.84
-	-	-	finsand	0.37	3.01	7.58
-	-	Tønder 2	finsandsten	0.26	3.17	5.73
-	G-2	Vedsted 1	sandsten	0.27	3.84	7.58
Vinding	-	Gassum 1	lerskifer	0.06	2.32	2.54
-	-	-	- (kalk)	0.13	1.89	2.23
-	-	-	-	0.13	1.65	1.92
-	-	-	kalkst. kongl.	0.10	2.48	2.88
-	-	Tønder 2	kalksten	0.10	2.77	3.27

Formation eller tidsafsnit	Member eller tidsafsnit	Boring	Bjergart	Ø	K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	K _s (W m ⁻¹ K ⁻¹)
–		Vinding 1	lerskifer	0.24	1.61	2.20
–		–	–	0.16	2.11	2.65
Oddesund		Rødby 1	lersten	0.26	1.71	2.47
–		Tønder 2	–	0.25	2.16	3.27
–		Ullerslev 1	–	0.21	2.49	3.62
–		–	–	0.26	1.90	2.83
–		Vinding 1	sandsten (ler)	0.17	2.33	3.05
Tønder		Gassum 1	sandsten	0.12	3.55	4.51
Falster		Arnum 1	finsandsten (kalk)	0.19	2.23	3.01
–		Glamsbjerg 1	sandsten	0.31	2.49	4.71
–		Ringe 1	lersten	0.24	1.80	2.55
–		Rødby 1	–	0.21	2.60	3.87
–		–	lerskifer (kalk)	0.14	2.53	3.22
–		Tønder 1	lersten	0.20	1.46	1.86
Ørslev		Arnum 1	lersten	0.41	1.65	3.26
–		Gassum 1	siltsten	0.17	2.86	3.94
–		Rødby 1	dolomit/anhydrit	0.02	5.15	5.42
Bunter		Arnum 1	sandsten	0.34	2.33	4.71
–		Gassum 1	–	0.20	3.65	5.69
–		Rødby 1	lersten	0.20	2.09	2.83
–		Tønder 1	–	0.25	2.98	3.13
Skagerrak		Vedsted 1	sandsten	0.25	3.82	7.03
Bunter		Arnum 1	lersten	0.35	1.68	2.89
Zechstein		Hønning 1	dolomit/anhydrit	0.02	6.43	6.76
–		Tønder 1	stensalt (+anh.)	0.03	6.17	6.62
–		–	anhydrit	0.05	6.20	6.95
–		Tønder 2	–	0.03	6.09	6.50
–		Uglev 1	–	0.03	5.57	5.90
–		–	stensalt	0.03	5.48	5.79
Rotliegendes		Rødby 2	lersten (sand)	0.06	3.71	4.14
Perm/eokambrium		Ringe 1	sandsten	0.06	3.48	3.89
Præ ø. perm		Hønning 1	lerskifer	0.11	1.86	2.12
Ord./silur		Slagelse 1	dolomit	0.01	4.49	4.61
–		–	sandsten	0.02	3.48	3.61

Varmeproduktion beregnet på grundlag af målte koncentrationer af uran, thorium og kalium

Formation eller tidsafsnit	Bjergart	Boring	Uran (ppm)	Thorium (ppm)	Kalium (%)	Massefylde (10^3kg m^{-3})	Varmeproduktion (μWm^{-3})
Eocæn	ler	Viborg 5	0.8	8.5	1.58	1.40	0.51
Eocæn	ler	Viborg 5	1.6	3.6	0.61	1.40	0.38
Ø. kridt	skrivekridt	Gassum 1	0.4	0.9	0.18	1.78	0.12
Ø. kridt	skrivekridt	Uglev 1	0.2	0.6	0.01	2.27	0.08
N. kridt	lersten	Uglev 1	2.8	12.9	2.00	1.54	1.07
Børglum	lersten	Gassum 1	3.5	16.9	1.72	1.99	1.71
Fjerritslev	lerskifer	Gassum 1	2.5	14.5	2.20	2.58	1.84
Fjerritslev	lerskifer	Lavø 1	2.1	14.8	2.88	2.38	1.68
Gassum	sandsten	Gassum 1	0.8	2.4	1.95	1.88	0.40
Vinding	lerskifer	Gassum 1	2.7	15.2	2.65	2.52	1.93
Oddesund	lerskifer	Gassum 1	3.6	9.6	3.14	2.38	1.72
Oddesund	lersten	Tønder 2	2.3	9.2	2.39	2.10	1.17
Tønder	lerskifer	Gassum 1	4.1	16.8	3.36	2.38	2.31
Muschelkalk	lersten	Tønder 1	2.2	7.1	1.78	2.24	1.05
Röt	lersten/siltst.	Gassum 1	3.4	11.1	3.46	2.32	1.75
Bunter	sandsten	Gassum 1	0.8	2.3	0.88	2.12	0.36
Bunter	lersten	Tønder 1	3.3	10.9	2.38	2.24	1.57
Zechstein	stensalt	Uglev 1	0.1	0.4	0.02	2.11	0.04
Zechstein	dolomit	Tønder 2	3.0	0.8	0.12	2.79	0.88
Zechstein	anhydrit	Tønder 2	0.9	0.3	0.01	2.94	0.28
Rotliegendes	lersten	Rødby 2	2.6	11.1	2.36	2.63	1.67
Ord./Silur	lerskifer	Slagelse 1	3.0	15.2	2.92	2.74	2.21

(Der er foretaget målinger på yderligere 6 prøver fra Aars 1a. Disse resultater er ikke medtaget her, men anvendt i histogrammet på fig. 5). Massefylden gælder for tørt materiale.

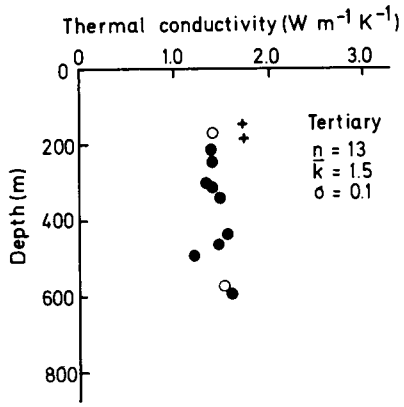


Fig. 1.

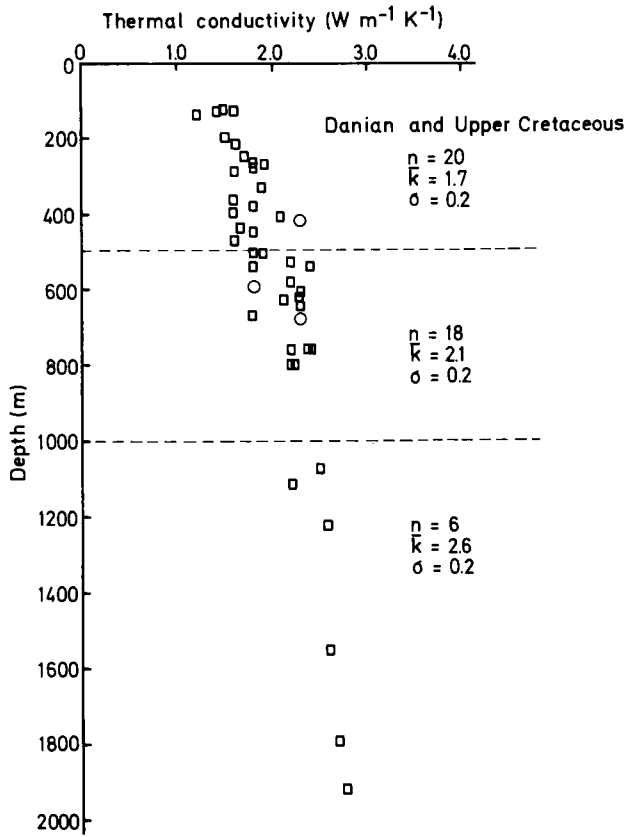


Fig. 2.

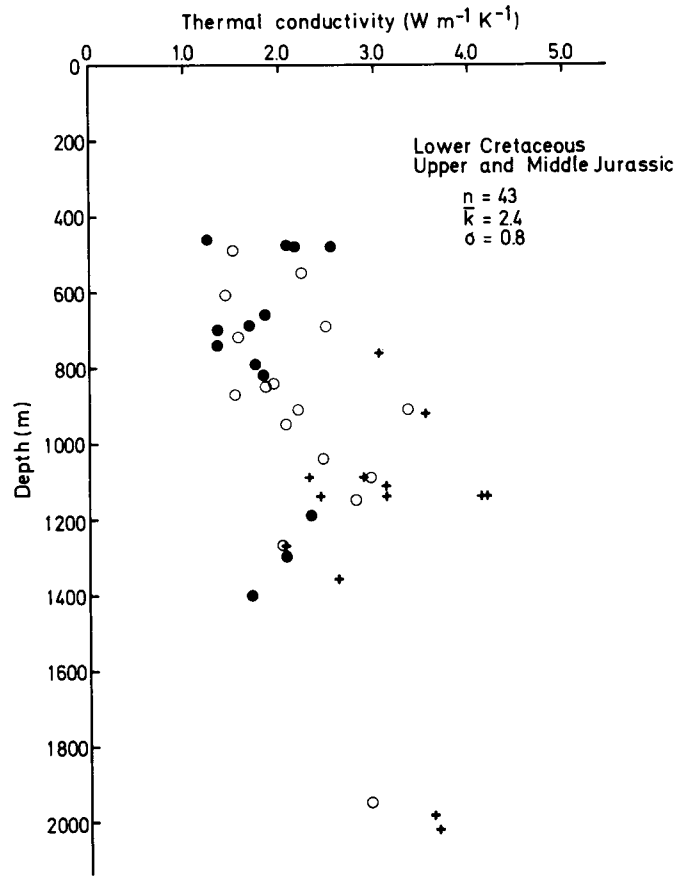


Fig. 3.

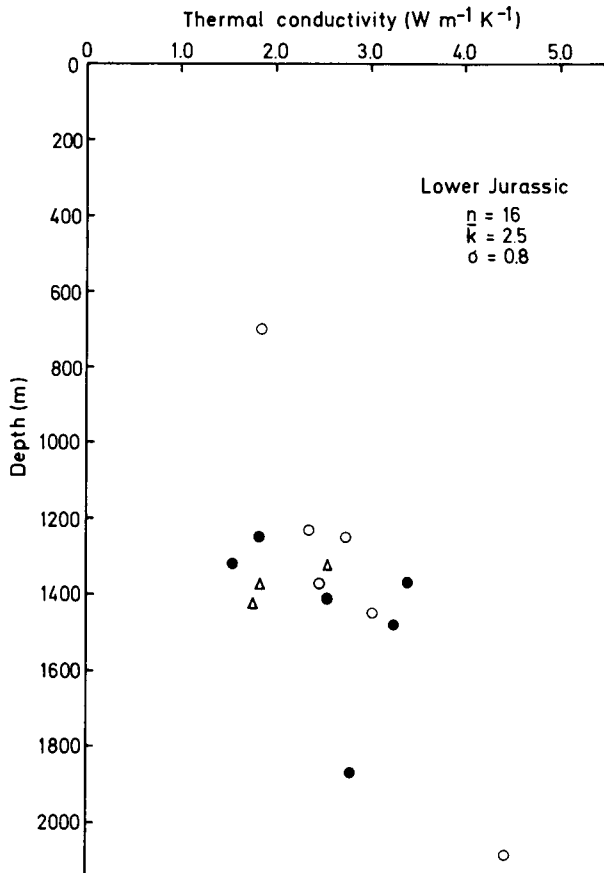


Fig. 4.

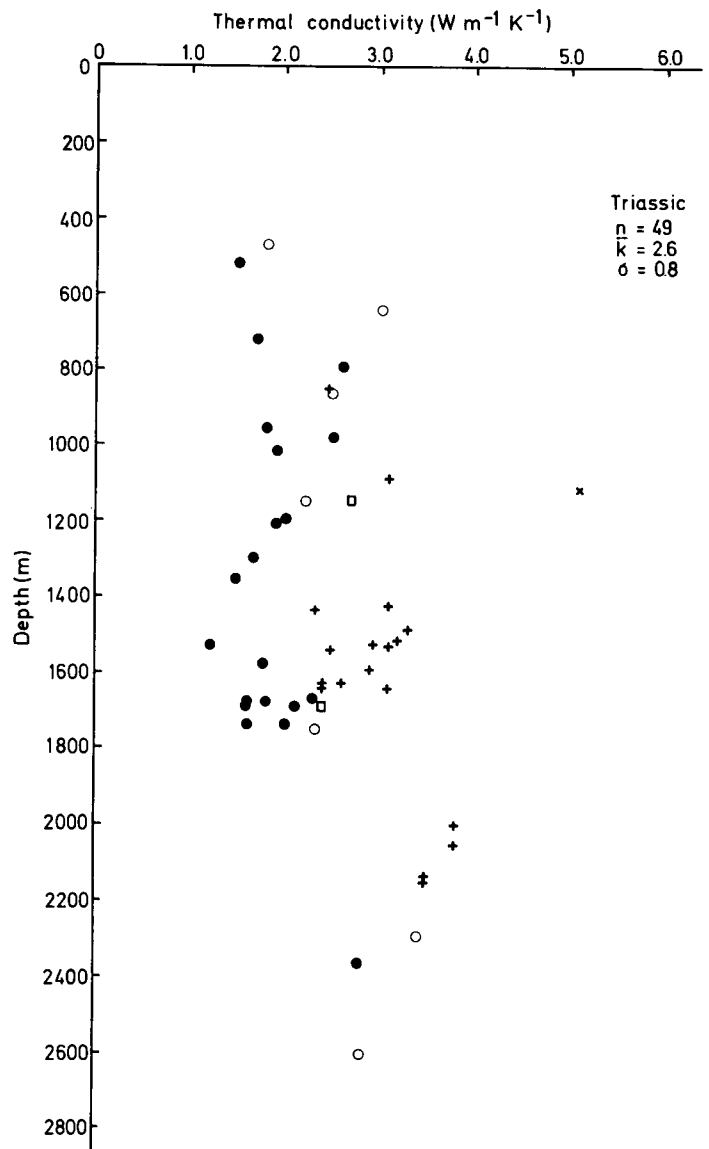


Fig. 5.

Signaturforklaring til figurene

- Kalk og kalksten
- + Sand og sandsten
- Ler, lersten og lerskifer
- Siltsten, finsandsten, lerede sandsten, sandede lersten og sandede lerskifer
- △ Lerjernsten
- × Dolomit og anhydrit

Appendix 3

Beregningsresultater fra vurderingen af reserveerne.

Computed results from the evaluation of the reserves.

De vigtigste beregningsresultater fra vurderingen af reserveerne er præsenteret i tabel 1–4. I hver tabel er der samlet resultater for ét transmissivitetsniveau og ét fjernvarmetemperaturniveau. Foruden resultaterne for hvert enkelt af de fire områder er der også i tabellerne inkluderet resultater for de fire områder tilsammen. De i denne kolonne angivne effekter, effekt- og udnyttelsesfaktorer samt transmissiviteter er arealvægtede middelværdier.

Følgende resultater er inkluderet i tabellerne:

Områdearealet

Den totale reservoireffektthæthed er den totale energitæthed i reservoiret divideret med levetiden.

Den totale reservoireffekt er den totale reservoireffektthæthed multipliceret med områdearealet.

Transmissiviteten

Geotermivandsvolumenstrømmen er fundet som den optimale ud fra den økonomiske analyse.

Anlægsarealet er fundet som fire gange kvadratet på den beregnede værdi af boringsafstanden mellem injektions- og produktionsboringen.

Den geotermiske bruttoanlægseffekt er den geotermiske effekt, som brutto produceres ved en enkelt dublet.

Den geotermiske nettoanlægseffekt er den geotermiske bruttoanlægseffekt fratrukket den primære effekt til injektions- og produktionspumperne.

De geotermiske brutto- og nettoeffektthætheder er de geotermiske brutto- og nettoanlægseffekter divideret med anlægsarealet.

Den geotermiske primære effektfaktor er forholdet mellem den geotermiske nettoanlægseffekt og den primære effekt tilført injektions- og produktionspumpen.

Bruttoanlægseffekten er den fjernvarmeeffekt, som brutto leveres fra et enkelt anlæg.

Nettoanlægseffekten er bruttoanlægseffekten fratrukket den samlede primære effekt tilført injektions- og produktionspumpen samt kompressorerne.

Brutto- og nettoeffektthæthederne er brutto og nettoanlægseffekterne divideret med anlægsarealet.

De totale brutto- og nettoeffekter er brutto- og nettoeffektthæthederne multipliceret med områdearealet.

Den totale primære effektfaktor er forholdet mellem nettoanlægseffekten og den samlede primære effekt tilført injektions- og produktionspumpen samt kompressorerne.

Den totale netto udnyttelsesfaktor er forholdet mellem nettoeffektthætheden og den totale reservoireffektthæthed.

Tabel 1. Beregningsresultater for tilfældet med høj transmissivitet og højt fjernvarmetemperaturniveau.

Område	A	B	C1	C2	I alt
Område areal (km ²)	5200	3100	1700	9000	19000
Total reservoireffekt (GW)	70,6	163,0	53,6	140,0	427,2
Total reservoireffekttæthed (MW/km ²)	13,6	52,5	31,5	15,5	22,4
Tranmissivitet (Darcymeter)	6,0	12,5	7,5	3,2	5,9
Geotermivandsvolumenstrøm (m ³ /h)	263	362	279	128	–
Anlægsareal (km ²).	5,47	1,95	2,49	2,07	–
Geotermisk bruttoanlægseffekt (MW)	20,1	25,7	19,8	8,4	–
Geotermisk nettoanlægseffekt (MW)	12,3	15,8	12,0	5,0	–
Geotermisk bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	3,67	13,20	7,97	4,06	5,79
Geotermisk nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,25	8,09	4,85	2,42	3,52
Geotermisk primær effektfaktor (–)	2,59	2,60	2,55	2,48	2,54
Bruttoanlægseffekt (MW)	31,4	41,3	31,6	13,6	–
Nettoanlægseffekt (MW)	10,6	13,6	10,3	4,1	–
Bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	5,74	21,20	12,70	6,59	9,29
Nettoeffekttæthed (MW/km ²)	1,94	7,00	4,13	2,00	2,99
Total bruttoeffekt (GW)	29,9	65,6	21,6	59,3	176,4
Total nettoeffekt (GW)	10,1	21,7	7,0	18,0	56,8
Total primær effektfaktor (–)	1,51	1,49	1,48	1,44	1,47
Total netto udnyttelsesfaktor (–)	0,143	0,133	0,131	0,129	0,133

Table 2. Beregningsresultater for tilfælde med lav transmissivitet og højt fjernvarmetemperaturniveau.

Område	A	B	C1	C2	I alt
Områdeareal (km ²)	5200	3100	1700	9000	19000
Total reservoireffekt (GW)	70,6	163,0	53,6	140,0	427,2
Total reservoireffekttæthed (MW/km ²)	13,6	52,5	31,5	15,5	22,4
Transmissivitet (Darcymeter)	1,20	3,75	2,25	1,20	1,71
Geotermivandsvolumenstrøm (m ³ /h)	71	177	113	51	–
Anlægsareal (km ²).	1,48	0,96	1,01	0,82	–
Geotermisk bruttoanlægseffekt (MW)	5,4	12,6	8,0	3,4	–
Geotermisk nettoanlægseffekt (MW)	3,3	7,6	4,8	2,0	–
Geotermisk bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	3,67	13,20	7,97	4,06	5,79
Geotermisk nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,25	7,98	4,83	2,46	3,52
Geotermisk primær effektfaktor (–)	2,58	2,54	2,54	2,53	2,55
Bruttoanlægseffekt (MW)	8,4	20,0	12,7	5,4	–
Nettoanlægseffekt (MW)	2,8	6,4	4,1	1,7	–
Bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	5,71	21,00	12,70	6,59	9,25
Nettoeffekttæthed (MW/km ²)	1,89	6,72	4,04	2,03	2,94
Total bruttoeffekt (GW)	29,7	65,0	21,5	59,3	175,5
Total nettoeffekt (GW)	9,9	20,8	6,9	18,3	55,8
Total primær effektfaktor (–)	1,50	1,47	1,47	1,44	1,46
Total netto udnyttelsesfaktor (–)	0,140	0,128	0,128	0,131	0,131

Tabel 3. Beregningsresultatet for tilfældet med høj transmissivitet og lavt fjernvarmetemperaturniveau.

Område	A	B	C1	C2	I alt
Områdeareal (km ²)	5200	3100	1700	9000	19000
Total reservoireffekt (GW)	70,6	163,0	53,6	140,0	427,2
Total reservoireffekttæthed (MW/km ²)	13,6	52,5	31,5	15,5	22,4
Transmissivitet (Darcymeter)	6,0	12,5	7,5	3,2	5,9
Geotermivandsvolumenstrøm (m ³ /h)	282	403	303	139	–
Anlægsareal (km ²).	5,87	2,17	2,70	2,25	–
Geotermisk bruttoanlægseffekt (MW)	21,4	28,5	21,4	9,1	–
Geotermisk nettoanlægseffekt (MW)	12,7	16,6	12,5	5,2	–
Geotermisk bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	3,65	13,10	7,92	4,04	5,76
Geotermisk nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,16	7,61	4,63	2,32	3,35
Geotermisk primær effektfaktor (–)	2,46	2,39	2,40	2,35	2,39
Bruttoanlægseffekt (MW)	27,0	36,7	27,3	11,7	–
Nettoanlægseffekt (MW)	13,1	17,2	12,8	5,3	–
Bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	4,61	16,90	10,10	5,20	7,39
Nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,23	7,90	4,74	2,36	3,44
Total bruttoeffekt (GW)	24,0	52,3	17,2	46,8	140,3
Total nettoeffekt (GW)	11,6	24,5	8,1	21,3	65,5
Total primær effektfaktor (–)	1,94	1,88	1,88	1,83	1,87
Total netto udnyttelsesfaktor (–)	0,164	0,150	0,150	0,152	0,153

Tabel 4. Beregningsresultater for tilfældet med lav tranmissivitet og lavt fjernvarmetemperaturniveau.

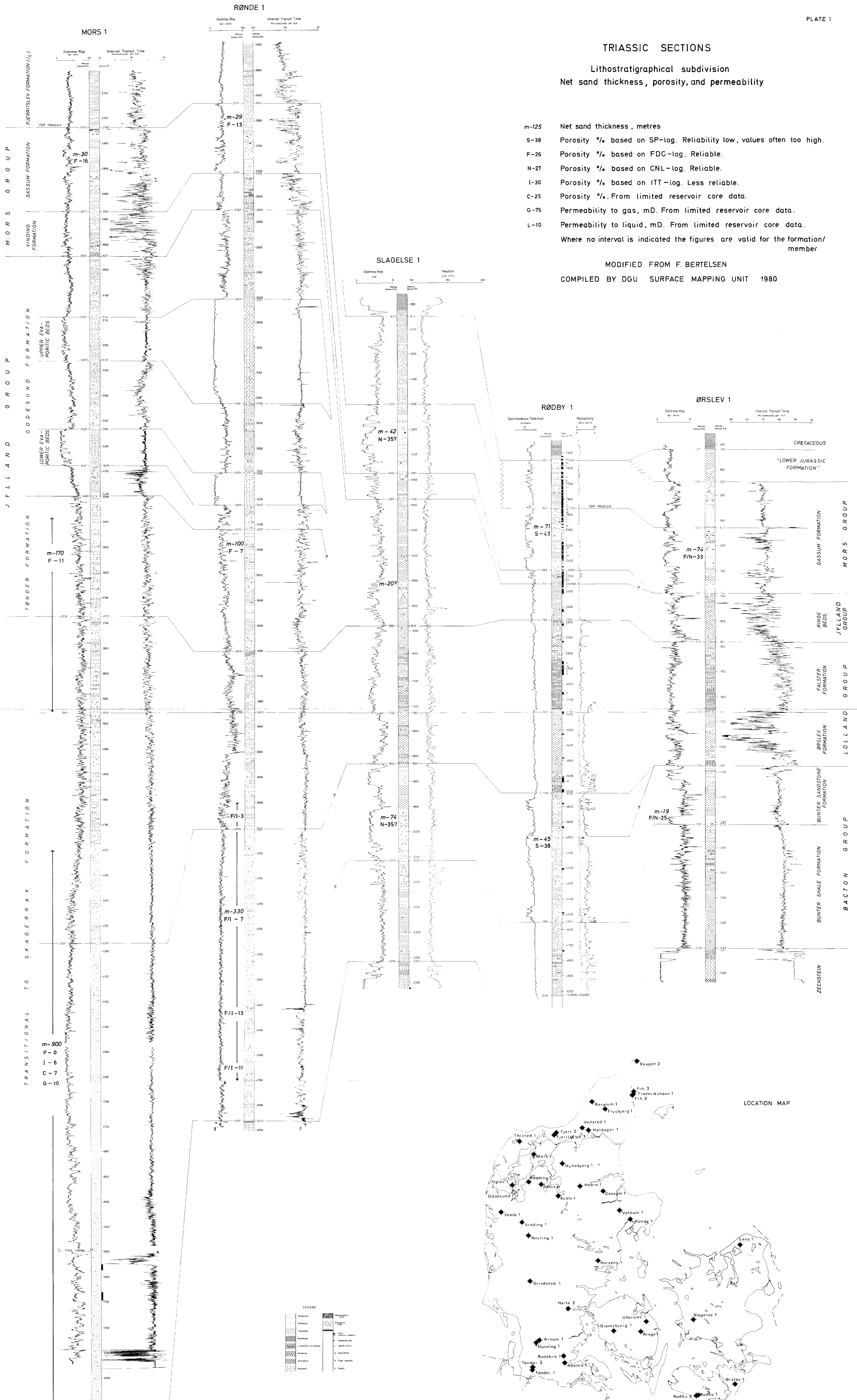
Område	A	B	C1	C2	I alt
Områdeareal (km ²)	5200	3100	1700	9000	19000
Total reservoireffekt (GW)	70,6	163,0	53,6	140,0	427,2
Total reservoireffekttæthed (MW/km ²)	13,6	52,5	31,5	15,5	22,4
Tranmissivitet (Darcymeter)	1,20	3,75	2,25	1,20	1,71
Geotermivandsvolumenstrøm (m ³ /h)	80	194	125	61	–
Anlægsareal (km ²).	1,66	1,05	1,11	0,99	–
Geotermisk bruttoanlægseffekt (MW)	6,1	13,7	8,8	4,0	–
Geotermisk nettoanlægseffekt (MW)	3,5	8,0	5,1	2,2	–
Geotermisk bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	3,65	13,10	7,92	4,04	5,76
Geotermisk nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,12	7,61	4,59	2,27	3,31
Geotermisk primær effektfaktor (–)	2,39	2,39	2,38	2,29	2,34
Bruttoanlægseffekt (MW)	7,6	17,3	11,1	5,1	–
Nettoanlægseffekt (MW)	3,6	8,1	5,2	2,3	–
Bruttoeffekttæthed (MW/km ²)	4,57	16,50	9,99	5,16	7,28
Nettoeffekttæthed (MW/km ²)	2,15	7,70	4,62	2,28	3,34
Total bruttoeffekt (GW)	23,7	51,3	17,0	46,5	138,5
Total nettoeffekt (GW)	11,2	23,9	7,86	20,6	63,6
Total primær effektfaktor (–)	1,89	1,87	1,86	1,79	1,84
Total netto udnyttelsesfaktor (–)	0,159	0,147	0,147	0,147	0,149

TRIASSIC SECTIONS

Lithostratigraphical subdivision
Net sand thickness, porosity, and permeability

- m-125 Net sand thickness, metres
- S-38 Porosity % based on SP-log. Reliability low, values often too high.
- F-26 Porosity % based on FDC-log. Reliable.
- N-27 Porosity % based on CNL-log. Reliable.
- I-30 Porosity % based on ITT-log. Less reliable.
- C-25 Porosity % from limited reservoir core data.
- G-75 Permeability to gas, mD. From limited reservoir core data.
- L-10 Permeability to liquid, mD. From limited reservoir core data.

MODIFIED FROM F. BERTELSEN
COMPILED BY DGU SURFACE MAPPING UNIT 1980



LOCATION MAP

TRIASSIC SECTIONS

Lithostratigraphical subdivision
 Net sand thickness, porosity, and permeability
 of Gassum Formation

MODIFIED FROM
 F. BERTELSEN 1976
 D.G.U. 1980

VEDSTED 1

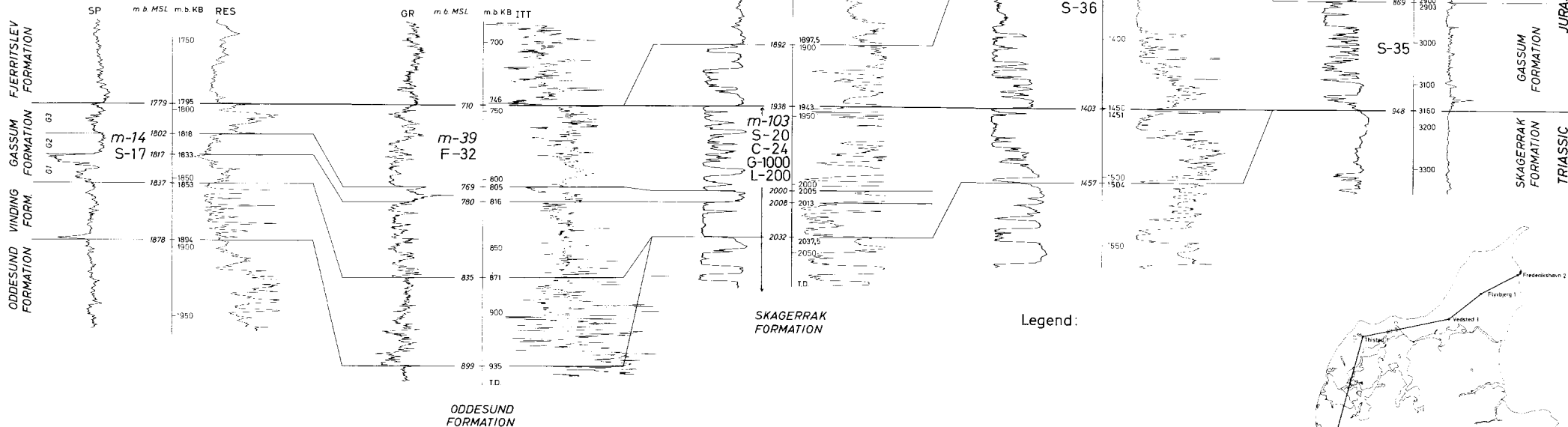
FLYVBJERG 1

PLATE 2

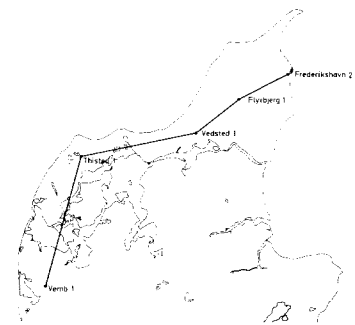
FREDERIKSHAVN 2

VENB 1

THISTED 1



Legend:



TØNDER 1

HØNNING 1

ÅBENRÅ 1

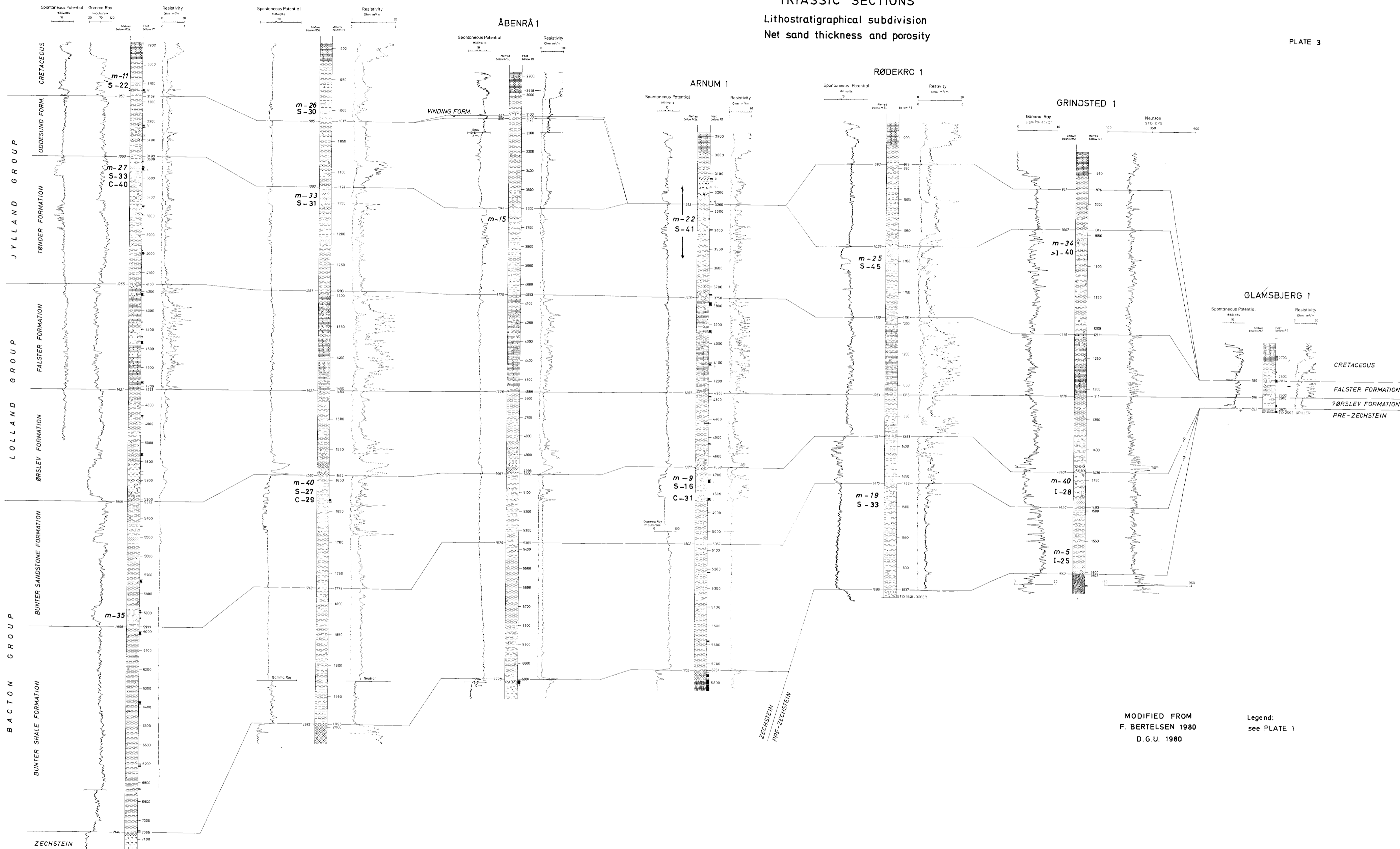
ARNUM 1

RØDEKRO 1

GRINDSTED 1

GLAMSBJERG 1

TRIASSIC SECTIONS
Lithostratigraphical subdivision
Net sand thickness and porosity



MODIFIED FROM
F. BERTELSEN 1980
D.G.U. 1980

Legend:
see PLATE 1

TRIASSIC SECTIONS

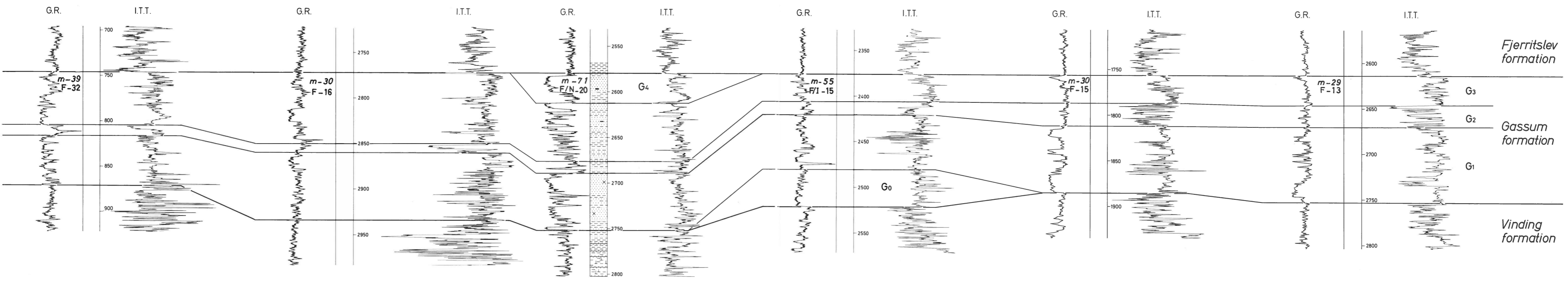
Lithostratigraphical subdivision
 Net sand thickness and porosity
 of Gassum Formation
 MODIFIED FROM
 F. BERTELSEN

G.R. = gamma stråling

I.T.T. = reciprok lydastighed (microsec./ft)

Legend:
 see PLATE 1

THISTED 1 MORS 1 HYLLEBJERG 1 HOBRO 1 VOLDUM 1 RØNDE 1

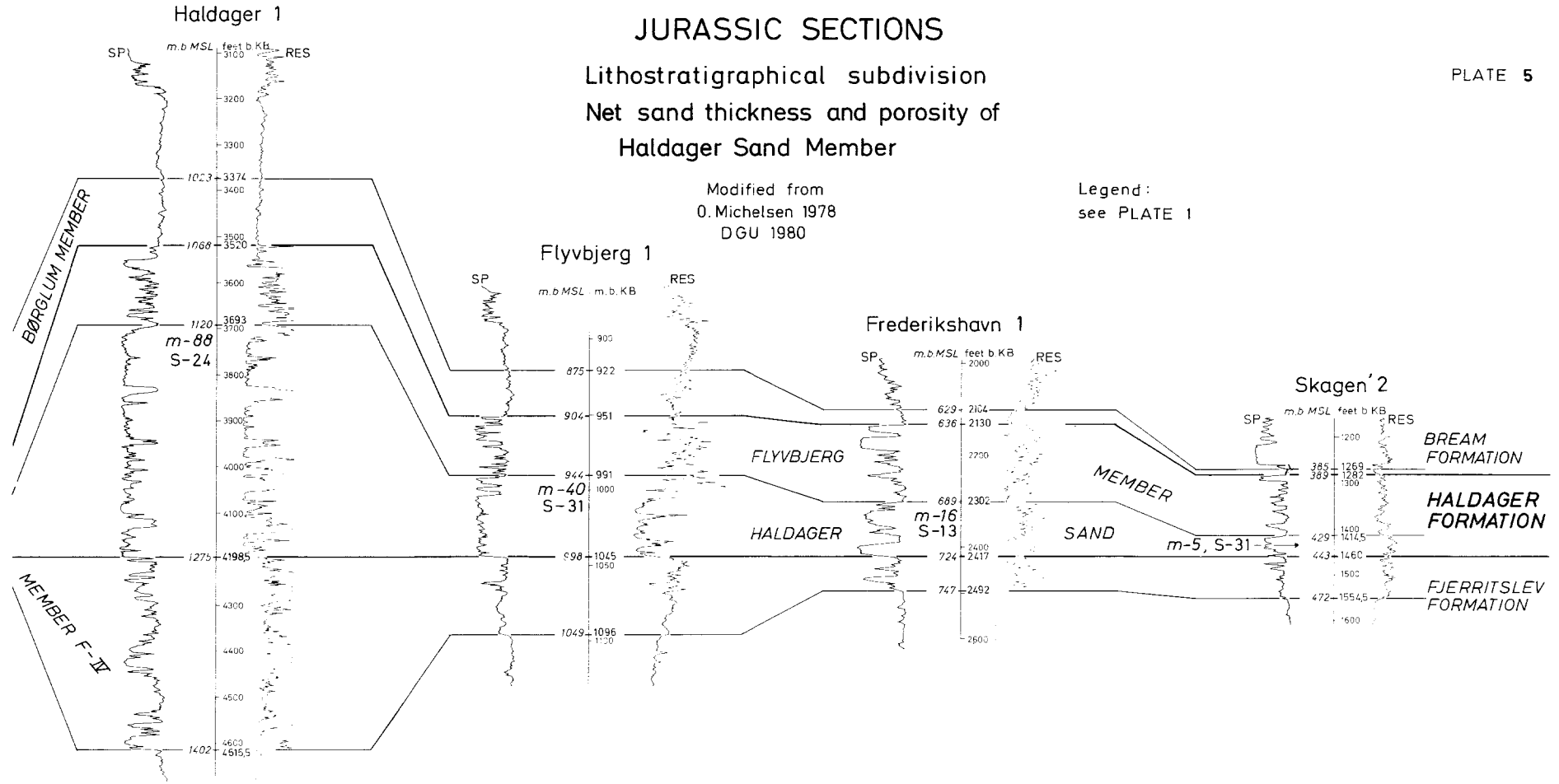


JURASSIC SECTIONS

Lithostratigraphical subdivision
 Net sand thickness and porosity of
 Haldager Sand Member

Modified from
 O. Michelsen 1978
 DGU 1980

Legend:
 see PLATE 1

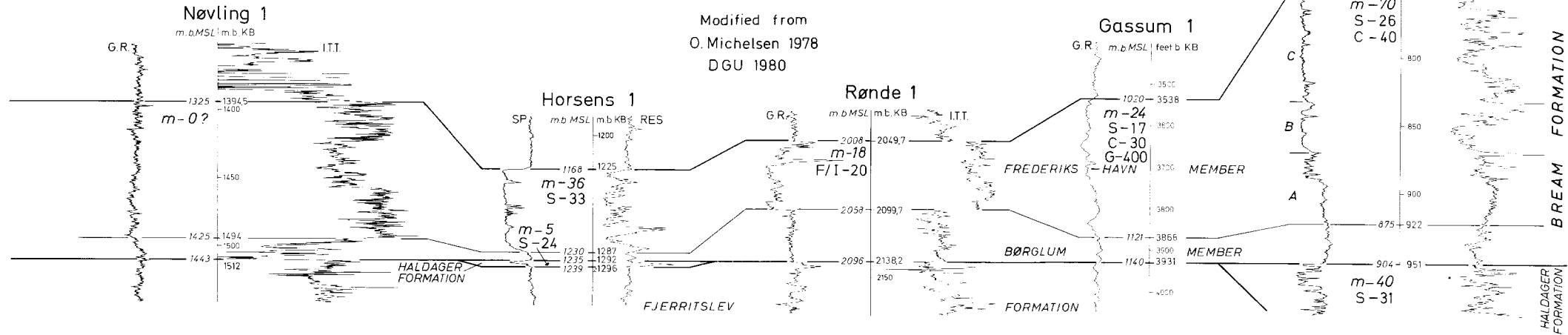


JURASSIC - LOWER CRETACEOUS SECTIONS

Lithostratigraphical subdivision
 Net sand thickness, porosity, and permeability
 of Haldager Formation and Frederikshavn Member

Legend:
 see PLATE 1

Modified from
 O. Michelsen 1978
 DGU 1980

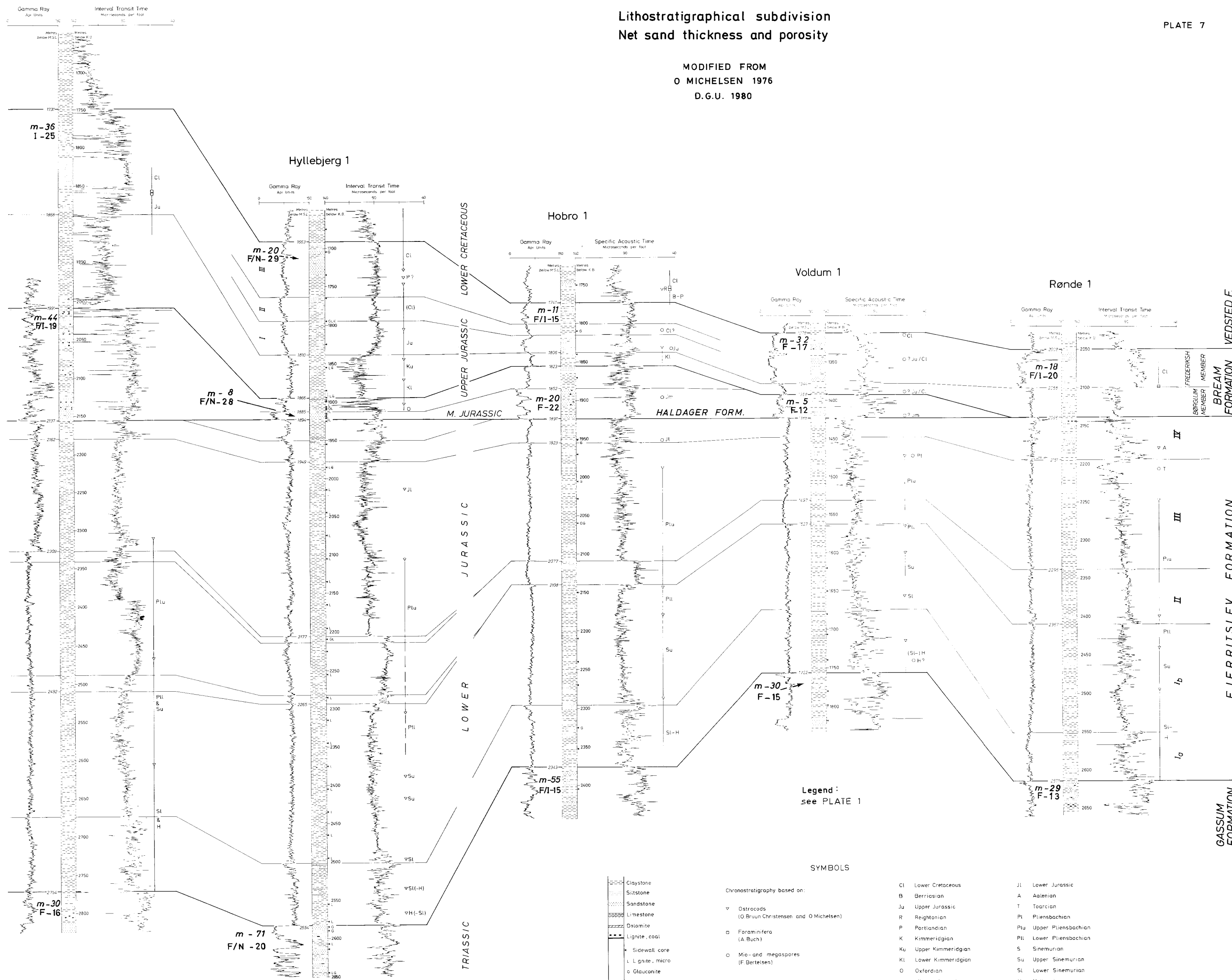


Jurassic Sections









Lithostratigraphical subdivision

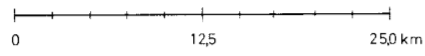
Net sand thickness and porosity

MODIFIED FROM
O MICHELSEN 1976
D.G.U. 1980



TOP GASSUM FORMATION

-  NORMAL FAULT
-  NORMAL FAULT, QUESTIONABLE
-  VALID CONTOURS
-  QUESTIONABLE CONTOURS
-  SALT - DIAPIR
-  REFLECTION BED ABSENT OR THIN
-  50 msec CONTOUR INTERVALS
-  WELL











INTERPRETATION BY
 GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK
 1979 - 80
 J.C. BAARTMAN J.C. OLSEN D. WOODWARD





REFLECTION ISOCHRONE CONTOURS ON
TOP TRIASSIC (GASSUM FORMATION)

- | | | | |
|---|---------------------------|---|-------------------------------|
|  | NORMAL FAULT |  | NORMAL FAULT, QUESTIONABLE |
|  | VALID CONTOURS |  | QUESTIONABLE CONTOURS |
|  | SALT-DIAPIR |  | REFLECTION BED ABSENT OR THIN |
|  | 50 msp. CONTOUR INTERVALS |  | WELL |

0 125 250 km

INTERPRETATION BY
GEOLOGICAL SURVEY OF DENMARK
1979 - 80
C. ANDERSEN - T. BIDSTRUP