



Jiří Hrubý, Ph.D.
geofyzik
www.hrby-ags.com

Základy Petrophysics

se zaměřením na těžbu ropy a zemního plynu
nebo užití pro jímání vody a ochraně životního prostředí

Stručný obsah

- Úvod do „Petrophysics“
- Základní karotážní metody
- Systémy a aplikace karotážních metod
- Racionální komplex karotážních metod
- Vzorkování a testování
- Laboratorní analýzy
- Interpretace petrofyzikálních dat



Petrophysics (- petrofyzika ???)

- Zabývá se studiem fyzikálních a chemických vlastností hornin a jejich interakcí s fluidy.
- V ropném průmyslu slouží pro pochopení kolektorských vlastností ložiska.
- Klíčovými parametry jsou litologie, porozita, nasycení, propustnost, hustota fluid atd.
- Hlavním zdrojem dat pro petrofyzikální studie jsou karotážní metody a laboratorní měření na jádrech.
- Tato data spolu s ložiskovými parametry jsou vstupními údaji pro cíle oboru Petrophysics.
- Měření na jádrech mohou mít větší význam než samotná karotážní data z hlediska přesnosti a nejistoty měření.
- Karotážní data jsou významná z hlediska objemu dat, komplexností informace a plošným pokrytím daného ložiska.

V ČR a bývalém bloku SSSR se obor petrofyzika zabývá studiem fyzikálních vlastností hornin.

Petrophysics je spíše chápána jako problematika geofyzikálních měření ve vrtech, interpretace karotážních dat.

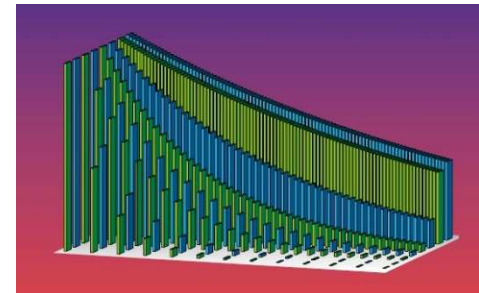


SPWLA journal

Petrophysics v praxi

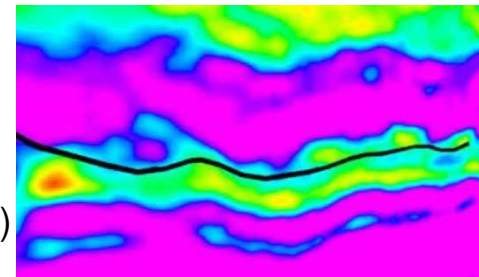
- Petrofyzikální ložiskové studie (petrophysical reservoir studies)

- vstupní údaje pro matematické a geologické modely
- základní údaje pro objemové výpočty
- parametry pro ověření režimu ložiska
- parametry pro aplikaci intenzifikačních metod
- monitoring ložiskových kontaktů
- lokalizace umístění nových vrtů

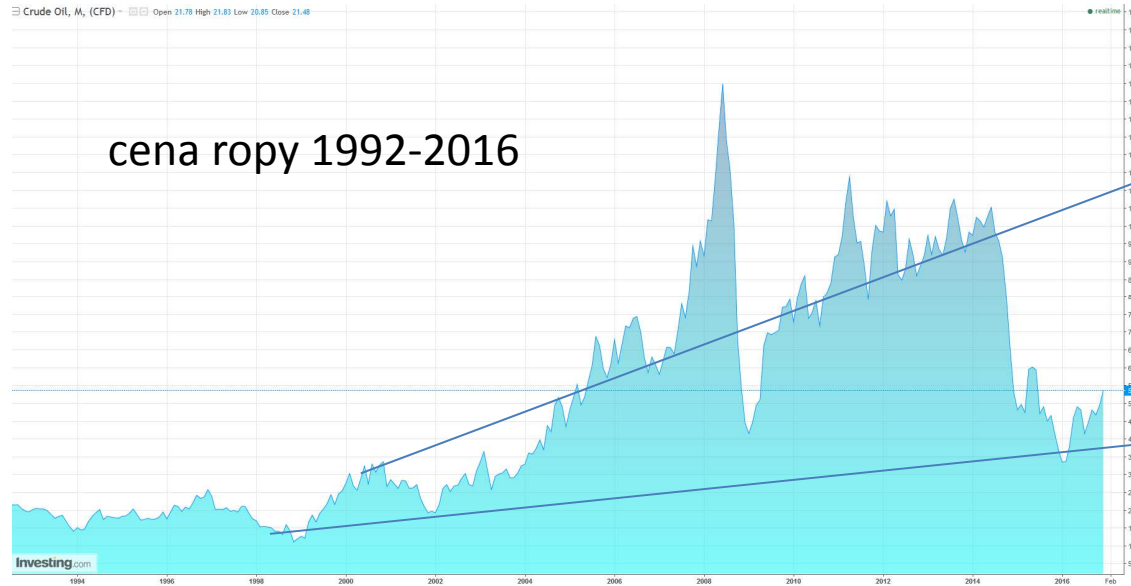


- Operační petrofyzika (operational petrophysics)

- stanovení metodik průzkumů (logging program, formation evaluation program)
- geo-steering horizontálních vrtů
- vyhodnocování real-time dat
- prvotní interpretace (quick-look evaluation)
- podpora technických operací
 - oprava výstroje nebo přestrojení vrtu (well workover)
 - hydraulické štěpení, kyselinování (fracturing, acidization)
- dozorování karotážních a laboratorních měření



Základy Petrophysics



cena ropy 1992-2016

trend cenových maxim

????
očekávaný rozsah cen
v nejbližších letech
????

trend cenových minim

Perspektiva oboru – současný stav – optimistický celkový výhled

- ceny ropy se pohybují v přirozených cyklech
- je patrná změna fundamentu – břidlicová ropa, obnovitelné zdroje energie, úspornější technologie
- narůstající prosperita a bohatství světového společenství přináší zvýšenou potřebu energií
- světová ekonomika je doposud založena na využívání fosilních paliv
- v budoucnu může voda nahradit roli ropy z pohledu těžby a využívání přírodních zdrojů

Uplatnění v praxi

- Domácí trh 
 - v měřítku spotřeby ropy v ČR je objem těžby ropy nevýznamný
 - v podzemním uskladňování plynu patří ČR ke špičce na světě
 - omezený počet firem zabývajících se těžbou ropy a zemního plynu
 - ropný průmysl se uplatňuje i v sousedních státech Polsko, Slovensko, Rakousko, Německo
- Zahraniční trh 
 - významné oblasti těžby ropy a zemního plynu – Severní moře, Černé moře, Střední východ, USA + mexický záliv, jižní Amerika, Kanada, Rusko + Kazachstán, Indie, jv. Asie, Afrika
 - poslední dobou hraje roli nestabilita prostředí – geopolitická rizika, kolísající ceny ropy
 - základním rysem prostředí jsou nadnárodní společnosti, multikulturní týmy
 - často sestavovány týmy pouze pro daný projekt – vhodné pro pozici nezávislého konzultanta

Základní karotážní metody

- Elektrické metody (< 100 kHz)
 - měření zdánlivý měrný elektrický odpor (apparent resistivity) [ohm.m]
 - potenciálové R_{ap} (normál), gradientové R_{ag} (laterál)
 - laterolog (fokusované) LL3, LL7, DLL, LLD, LLM, LLS

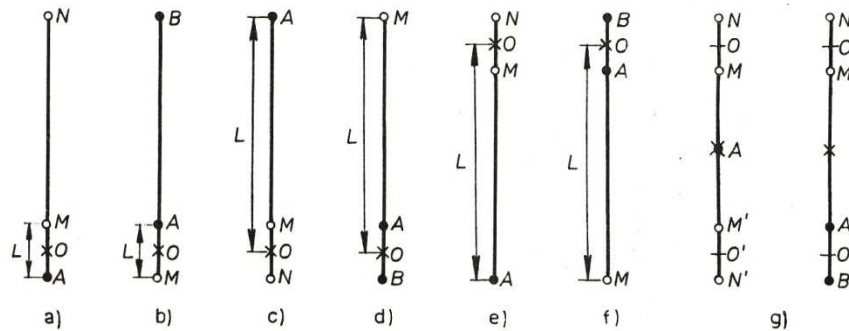


Schéma nejčastějších uspořádání elektrod u jednoduchých odporových sond
 a) potenciálové sondy jednopólové; b) potenciálové sondy dvoupólové; c) gradientová sonda podložní jednopólová; d) dvoupólová; e) gradientová sonda nadložní jednopólová; f) dvoupólová; g) speciální sondy (symetrická gradientová, označovaná též vápencová; dipólová sonda)

Mareš a kol., 1990

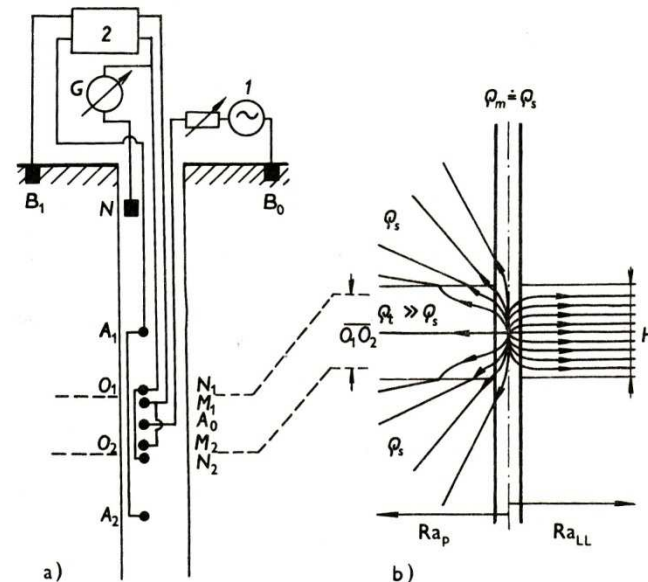


Schéma sedmielektrodeového bočního měření (a) a tvar proudových linií (b) z centrální elektrody u bočního měření R_{aLL} a z proudové elektrody u obyčejné potenciálové sondy R_{ap}
 1 – generátor střídavého stabilizovaného proudu; 2 – automatický regulátor pomocného proudu; G – registrační přístroj

Mareš a kol., 1990

Základní karotážní metody

- Elektrické metody (< 100 kHz)
 - odporová mikroměření ML (normál, laterál), MSFL, MLL [ohm.m]

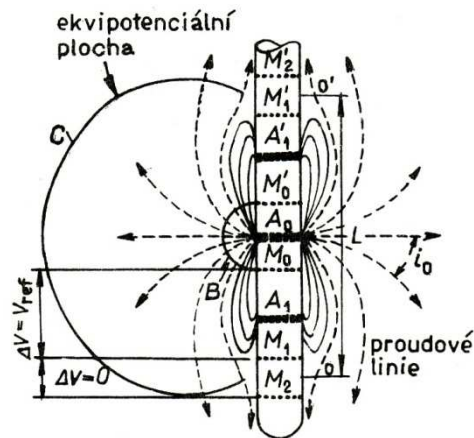
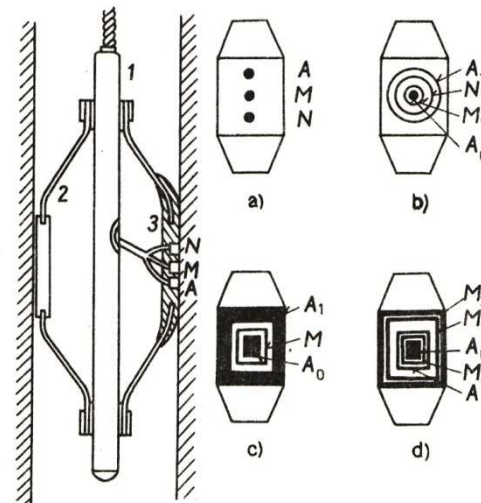


Schéma odporové karotáže se sférickou fokusací pole (podle O. Serra, 1979)



Nejjednodušší konstrukce mikrosond a uspořádání elektrod na izolační podložce pro mikrokarotáž (a), boční mikrokarotáž (b), karotáž přilehlé zóny (c) a odporovou mikrokarotáž se sférickou fokusací pole (d)
 1 – tělo sondy; 2 – přítlačná pružina; 3 – izolační podložka;
 A, B – proudové elektrody;
 M, N – měřicí a kontrolní elektrody

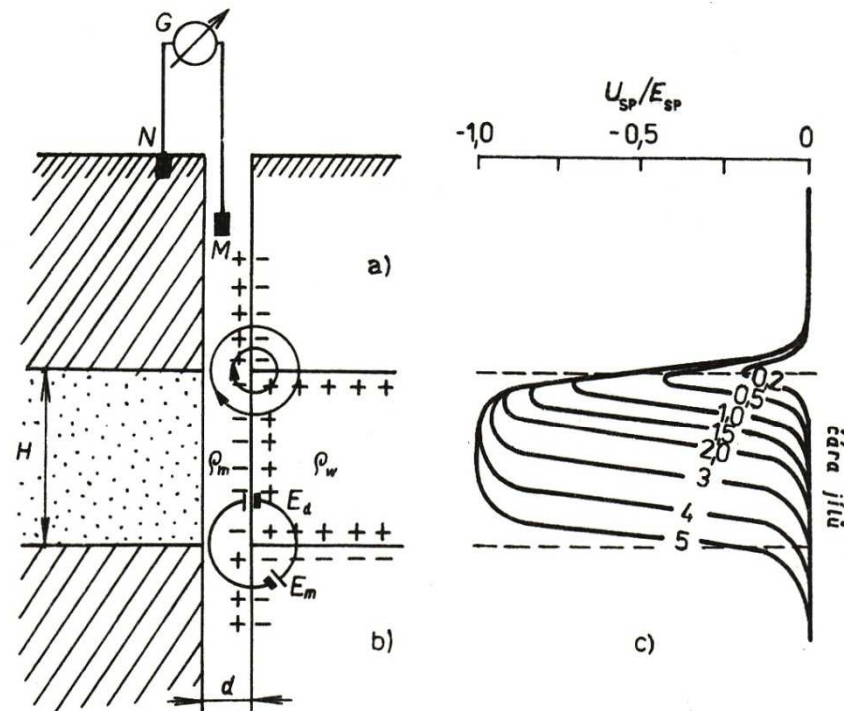
Mareš a kol., 1990

Základní karotážní metody

- Elektrické metody
 - spontánní polarizace SP [mV]

měřeny přirozené potenciály

- difúzně adsorpční (kolektor – izolátor)
- filtrační (výplach – vrstevní voda)
- oxidačně redukční (elektronová vodivost rud)

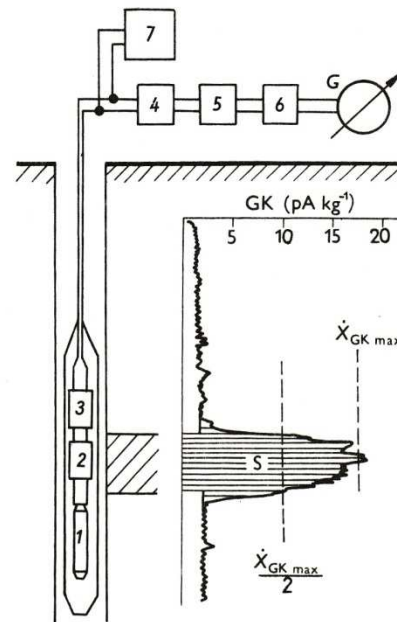


Vznik difúzně adsorpčních potenciálů v sedimentárních horninách při $\rho_w < \rho_m$ (a), ekvivalentní elektrické schéma (b) a tvar křivek $U_{SP}/E_{SP} = f(z)$ proti poloze čistých písků při měnícím se poměru H/d (c) Mareš a kol., 1990

Základní karotážní metody

- Elektromagnetické metody
 - indukční karotáž (< 100 kHz) IL, ILD, ILM
 - dielektrická karotáž (20-200 MHz) – relativní permitivita hornin, dielektrická konstanta
 - propagation resistivity (200 MHz – x GHz) – propagační čas, magnetická permeabilita

- Přirozená gama aktivita
 - úhrnná – total GR [gapi]
 - spektrální – spectral GR
 - SGR, CGR [gapi], obsah K [%], U [ppm], Th [ppm]

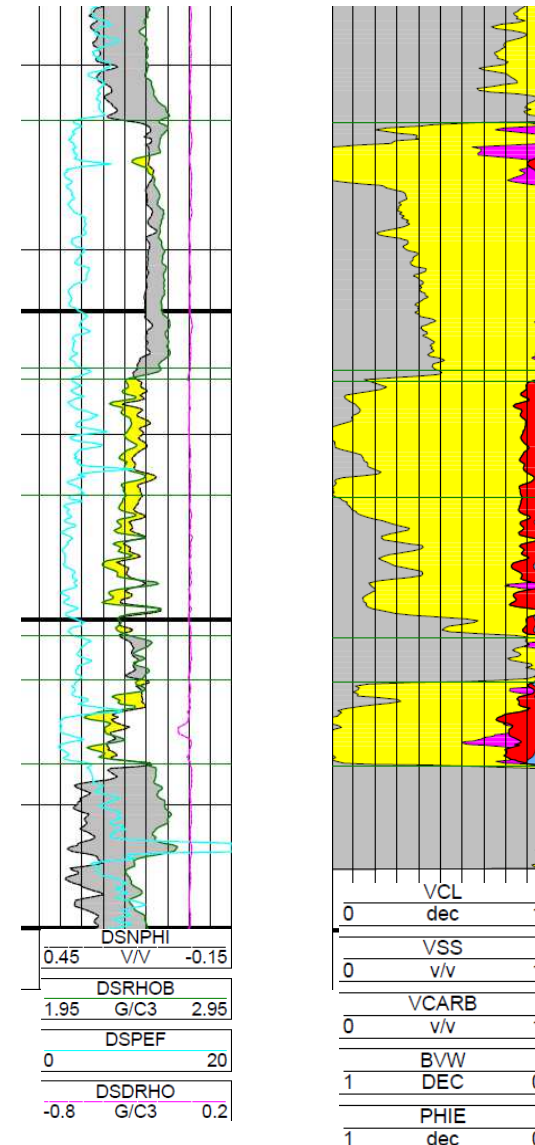


Obr. 411. Schéma karotážního radiometru a křivka GK proti radioaktivní rudní poloze
1 – střed GM-trubice – bod zápisu; 2 – generátor vysokého napětí; 3 – první zesilovací stupeň; 4 – druhý zesilovací stupeň; 5 – tvarovací obvod; 6 – integrátor; 7 – stejnosměrný zdroj pro napájení sondy; G – registrační přístroj; S – plocha anomálie GK

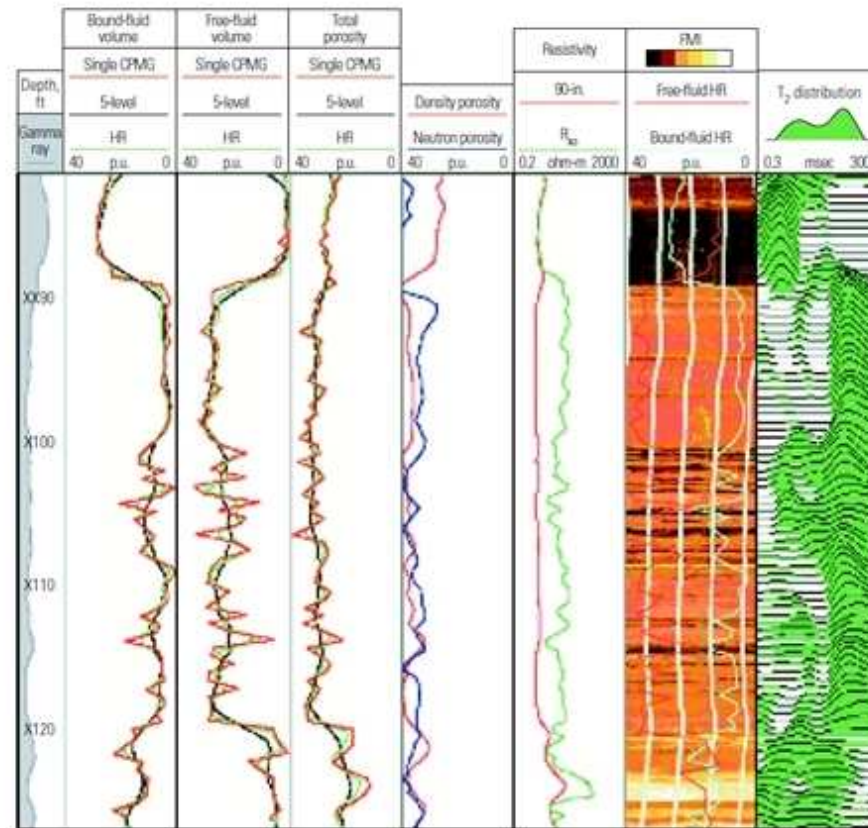
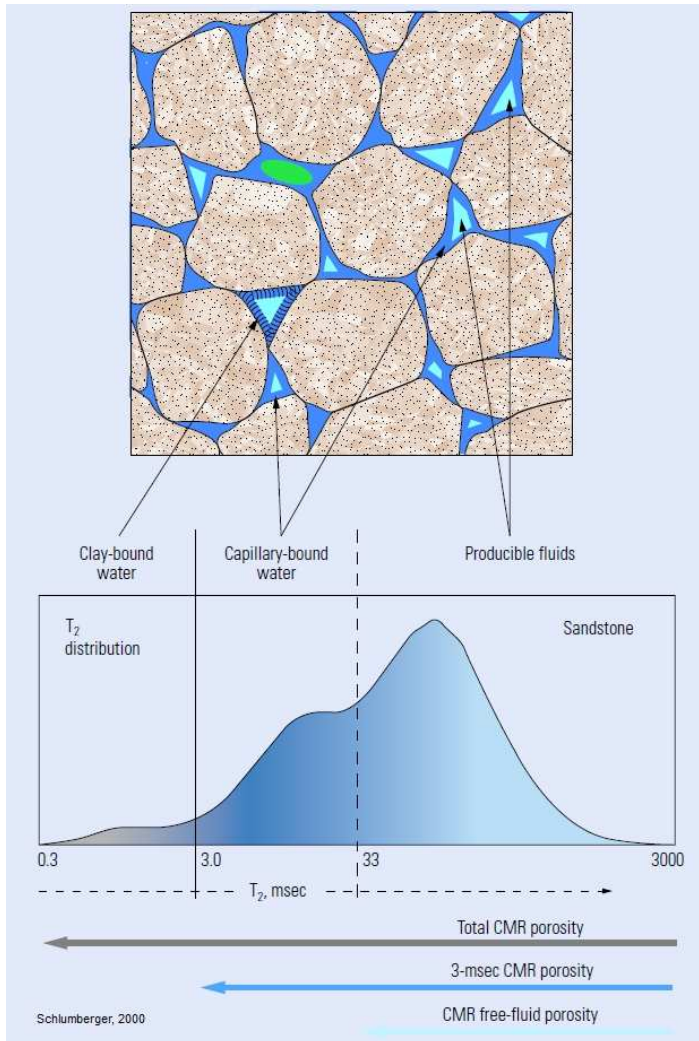
Mareš a kol., 1990

Základní karotážní metody

- Nukleární metody – měří se pole indukované zdrojem radioaktivního záření, výsledek požadované interakce záření s horninovou hmotou včetně pórových fluid
 - hustotní karotáž – RHOB, DRHO, ZDEN – hustota [g/cm³]
 - litho-density – fotoelektrický efekt PE [b/e]
 - neutronová karotáž – NEUT [imp], SNP, NPHI, TNPH – neutronová porozita [p.u., %], RST-sigma, poměr c/o
 - nukleárně magnetická karotáž – NMR, CMR z času relaxace magnetického pole H jader jsou počítány kolektorské vlastnosti a obsah fluid



NMR, CMR logging



High-resolution NMR log correlation with FMI images. In Tracks 1 to 3, the traditional bound-fluid, free-fluid and total porosity logs processed with five-level depth averaging (black) are compared with high-resolution curves (green), and corresponding single CPMG-derived estimates (red). Neutron (blue) and density (red) porosity logs are shown in Track 4 and the deep (red) and shallow (green) resistivity logs are shown in Track 5. Over the top zone, from XX90 to X100 ft, the high-resolution logs are relatively featureless and overlie the averaged logs.

Schlumberger, 2000

Základní karotážní metody

- Akustická (sonic) karotáž – měří se průběhový čas šíření ultrazvukových vln [us/m; us/ft]
- frekvence 1 - 20 kHz
 - DT, DTCO – compressional, primary wave
 - DTS – shear, secondary wave
 - DTST – Stoneley wave

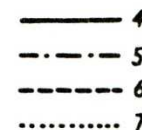
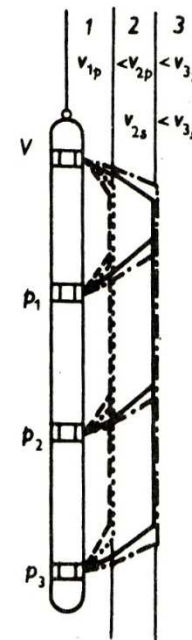


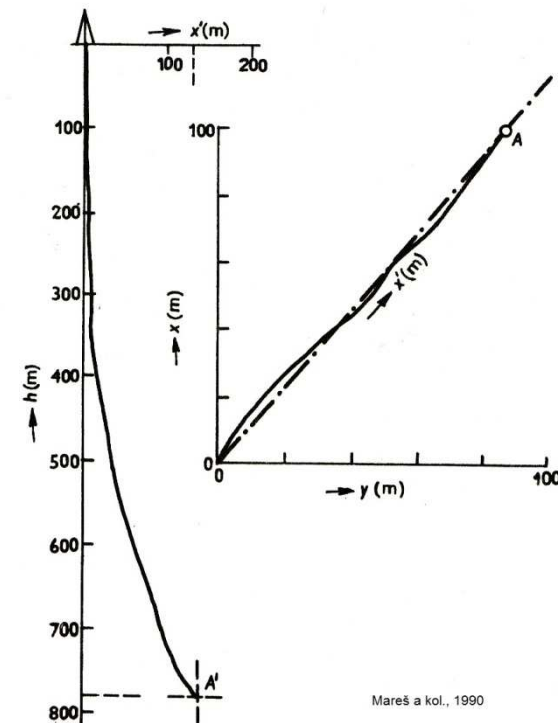
Schéma různých typů vln registrovaných při akustické karotáži
 1 – výplach; 2 – výplachem narušená část vrstvy;
 3 – neporušená hornina; 4 – vlna typu $P_1P_2PP_2P_1$;
 5 – $P_1P_2SP_2P_1$; 6 – P_1PP_1 ; 7 – P_1SP_1 ; V – vysílač ultrazvukového signálu; P_1 až P_3 – přijímače ultrazvukového signálu

Mareš a kol., 1990

Základní karotážní metody

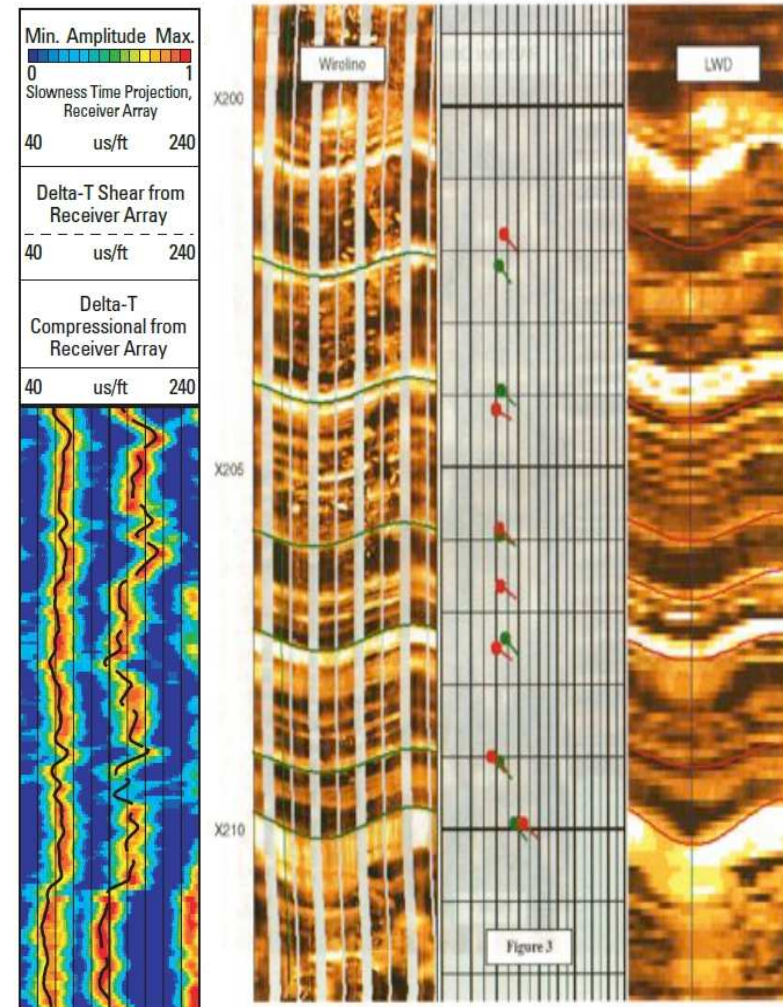
- Průběh a parametry vrtu
 - kavernometrie (caliper) – CALI [mm, inch]
 - x-arms caliper
 - ultrasonic caliper
 - inklinometrie (directional survey) – AZI, INC
 - termometrie – TEMP [°C, degF]
 - resistivimetrie – RM [ohm.m]

Projekce průběhu vrtu



Systemy karotážních metod

- Duální systémy (long – short spacing, near – far detectors) umožňují BHC měření
- High resolution logs – měřeno více frekvencí (v případě resistivity), tool processing přizpůsoben prostředí thin-laminated beds
- Array systémy (resistivity, sonic) – více vysílačů a přijímačů s použitím tool processing poskytují detailní obraz, opravy na prostředí většinou již zavedeny
- Azimuthal logs – měřeno v sektorech U, R, D, L
- Imager, Scanner (resistivity FMI, dipmeter, dielectric, litho, NMR, sonic, density) – produkují 3D obraz



Prilliman et al, 1977

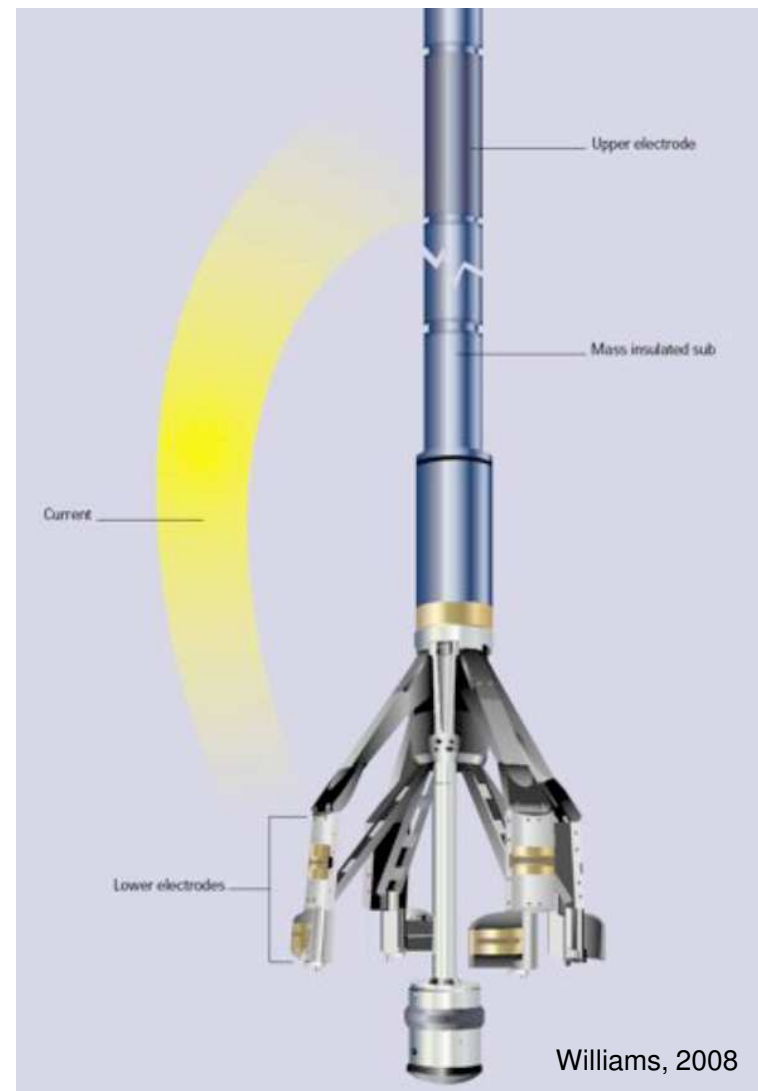
Základy Petrophysics



Scanner tools

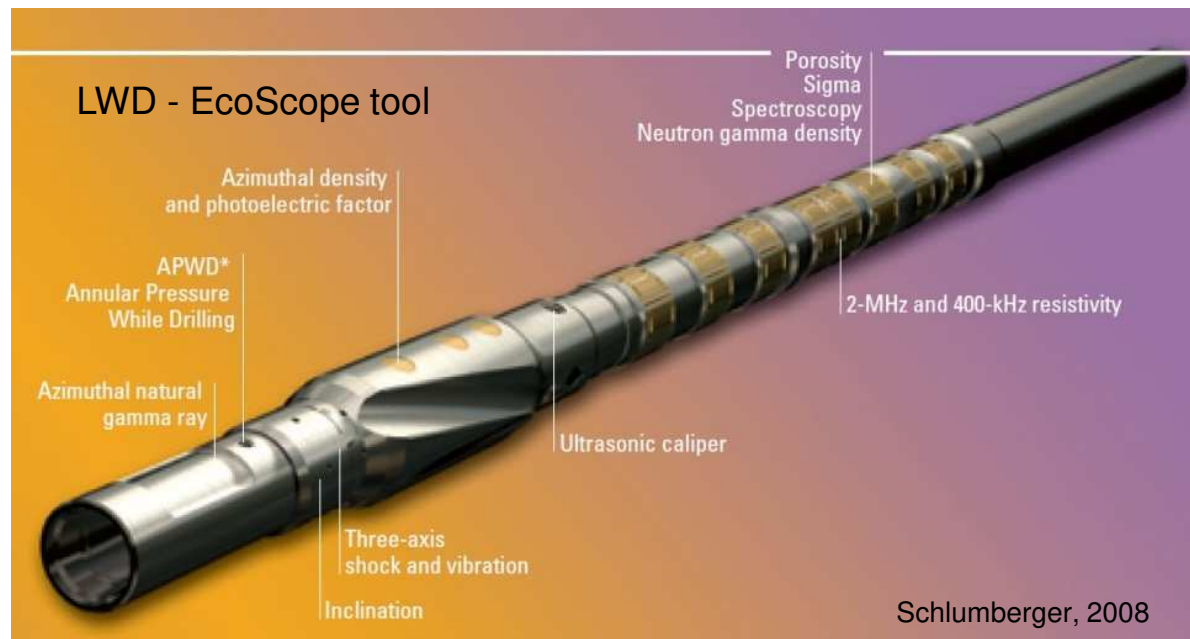


FMI tool



Aplikace karotážních metod

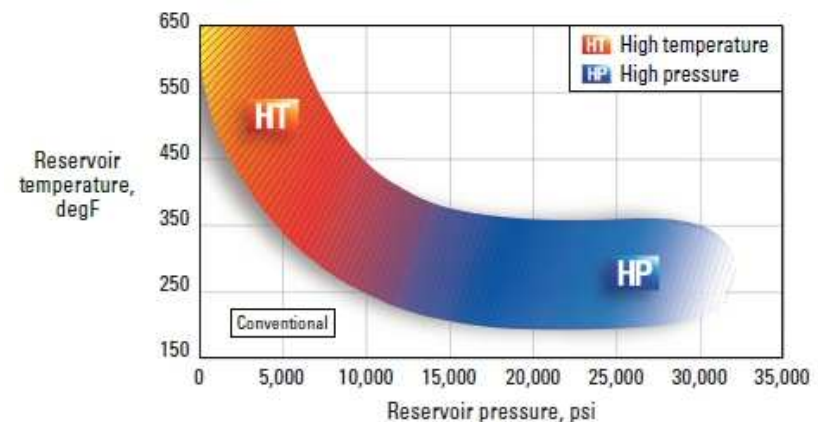
- Wireline (měření po kabelu)
 - nejpřesnější a nejlevnější typ měření
- LWD (logging while drilling)
 - real-time data, přenos pulsy přes výplach
 - memory data, přístupná po vytažení náradí
- TLC (tough logging conditions), PCL (pipe conveyed logging)
 - měřicí sondy jsou dopravovány vrtnými tyčemi



Karotážní metody dle průměru vrtu, tlaku a teploty

- Large boreholes 16-30 inch
 - větší vliv vrtu na naměřená data
 - obtížněji zajištěný kontakt sondy se stěnou vrtu
- Conventional boreholes 6-16 inch
- Slim boreholes 3-6 inch
 - stísněné rozměry limitují konstrukci sond

- Tlak a teplota prostředí
 - standard 15,000 psi; 300 degF



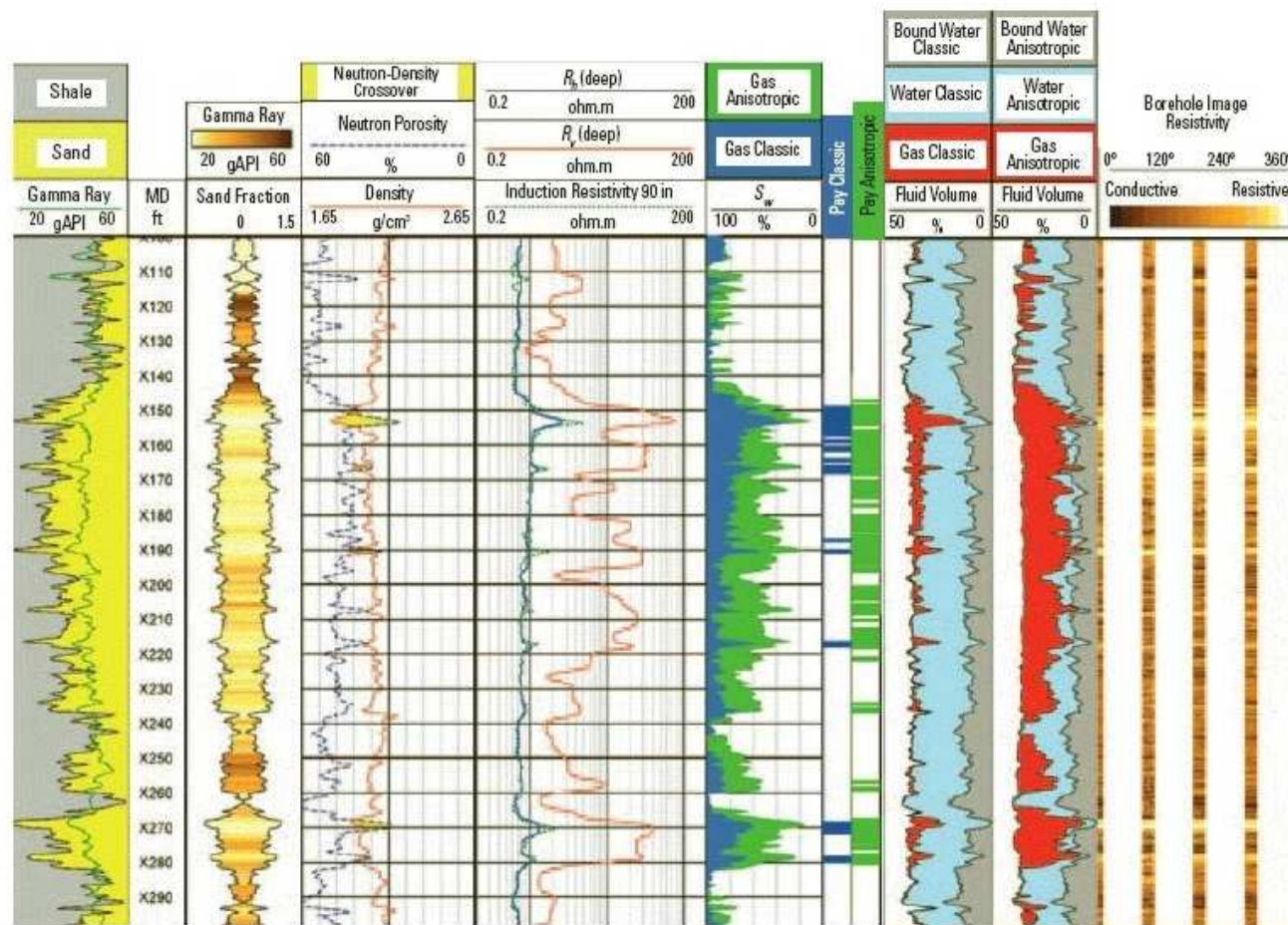
Racionální komplex karotážních metod

- Pro splnění cílů kladených na petrofyzikální vyhodnocení a analýzy je nutné zvolit vhodný racionální komplex karotážních metod.
- Dostupné karotážní metody, podmínky daného ložiska a ekonomický rámec projektu jsou určující pro sestavení racionálního komplexu karotážních metod.
- Výše uvedené základní karotážní metody reprezentují OH (open hole) logs - karotáž v nezapaženém vrtu.
- Pro úplnost je třeba zmínit i existenci CH (cased hole) logs – karotáž v zapažených vrtech, přestože tento typ dat není běžně předmětem petrofyzikálních vyhodnocení.

Nejběžnějšími metodami jsou: GR, SGR, pulsed-Neut (sigma), production logs, CBL.

V současnosti jsou dostupné prakticky veškeré základní OH logs ve variantě pro CH logs včetně resistivity. Avšak zavedení oprav na vliv vrtu je velmi problematické zejména ve starších vrtech.

Racionální komplex karotážních metod – OH logs

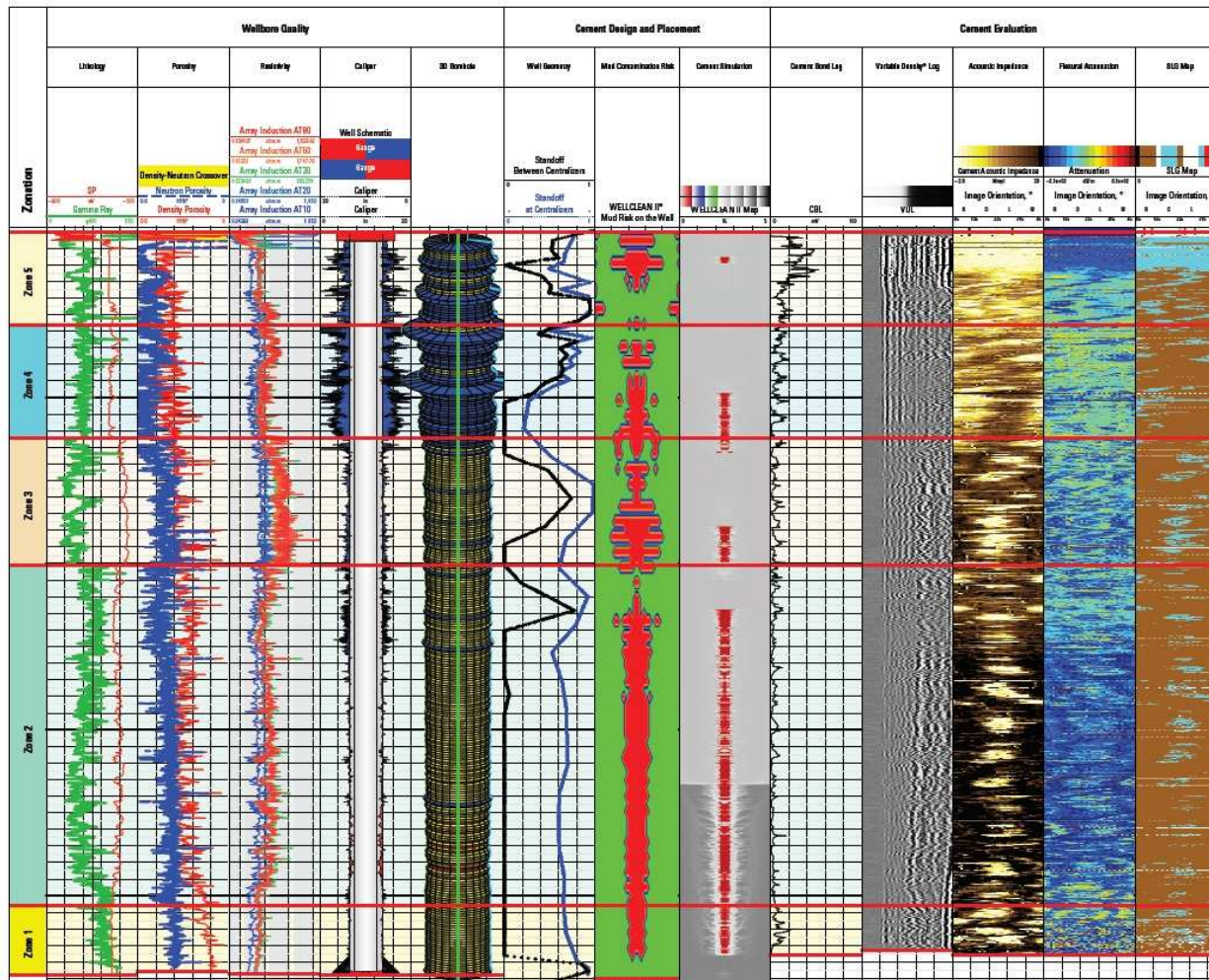


Schlumberger, 2017

Základy Petrophysics



CH logging - CBL



Data integration and analysis using Invizion Evaluation well integrity evaluation service enabled the operator to determine the quality of the cement bond and confirm that the cement had properly set.

Schlumberger, 2015

Vzorkování

- **Jádrování vrtů (coring, cored wells)**
 - plné vrtné jádro
 - 4 in průměr
 - výnos jádra (recovery ratio)
 - vzorky jader (plugs), 1.5 x 2.5 in
 - boční odběr jádra (sidewall coring, SWC)
 - nástřelem (gun shot), 1 x 1.5 in
 - vrtáním (rotary SWC), moderní nářadí až 50 jader, 1.5 x 2.5-3 in



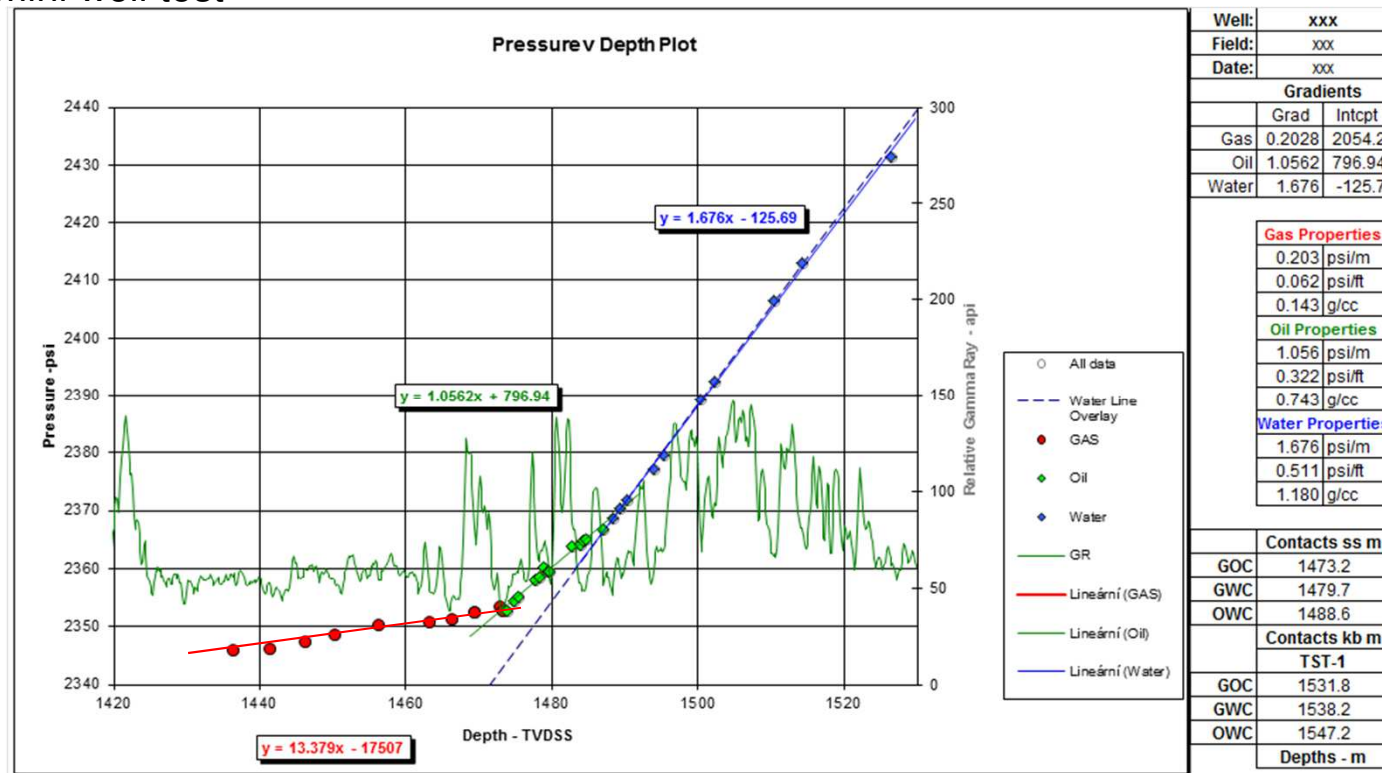
Vzorky jader o rozměru 1.5 x 2.5 in umožňují provedení veškerých laboratorních analýz.

Základy Petrophysics



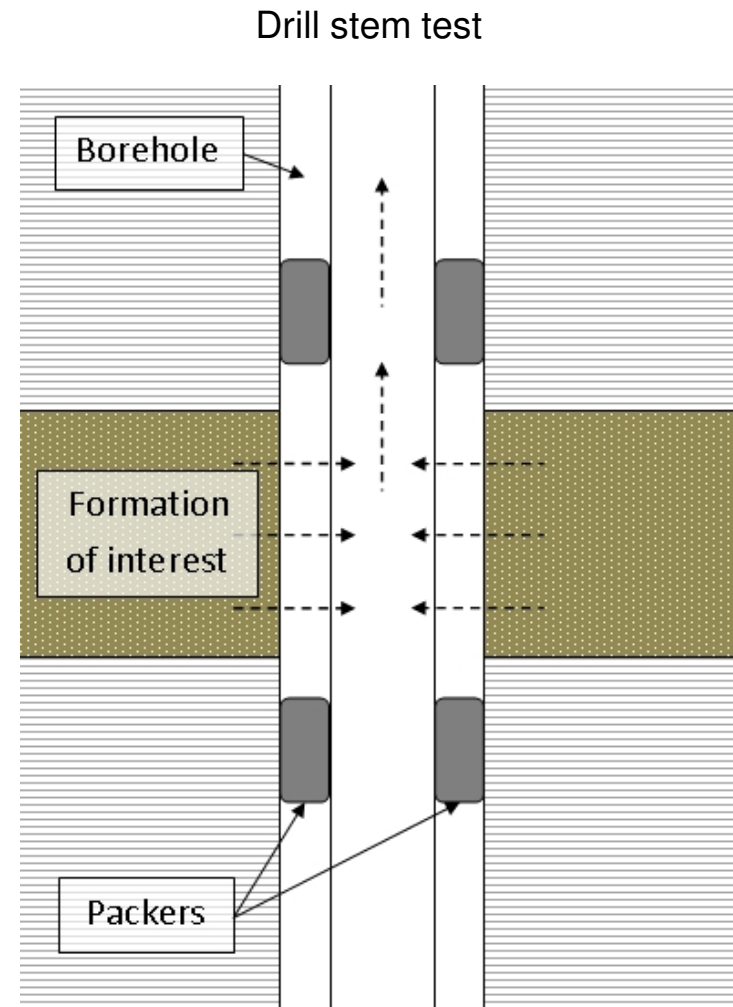
Testování (formation tester – MDT, XPT, RFT)

- odběr ložiskových fluid
 - nutné se zbavit filtrátu výplachu
- mini DST test (drill stem test)
 - mini well test
- měření ložiskového tlaku, mobility, teploty
 - měřeno pro danou hloubku
 - z tlakového gradientu lze usoudit na charakter fluida, polohu kontaktů



Produkční testy (Well tests)

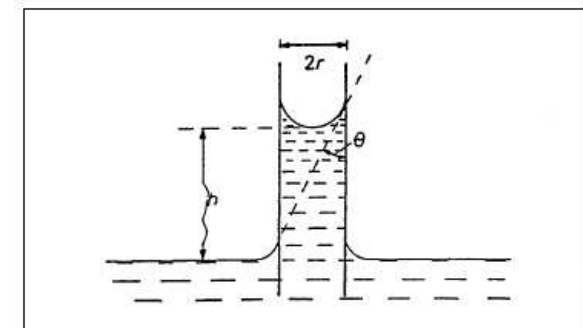
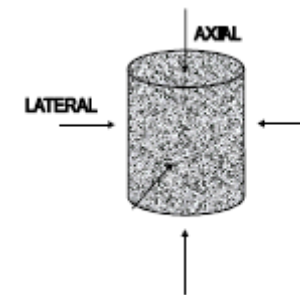
- DST (Drill stem test)
 - rychlá a levná varianta
 - využito vrtné nářadí
 - sleduje se čas (4 – 24 hod.) a výška fluidy nastoupaného sloupce
 - u průzkumných vrtů často jediný test
- Prvotní produkční testy (IP tests)
 - plnohodnotný test
 - po vystrojení sondy
 - teplota, tlak, množství a poměr fluid
 - první kvantitativní vyhodnocení produktivity vrtu



Laboratorní analýzy vrtných jader (core analysis)

Měření vrtných vzorků (core plugs)

- CCAL (Conventional Core Analysis), RCAL (Routine Core Analysis)
 - porozita (celková, efektivní), permeabilita (horizontální, vertikální), hustota matrice (grain density)
 - nasycení vodou – ropou (Dean-Stark extraction)
 - obsah karbonátů, poměr vápenec/dolomit (calcimetry)
 - měřeno za laboratorních podmínek (ambient conditions) nebo za určitého tlaku (confining pressure)
 - permeabilita může obsahovat Klinkenberg opravy – oprava na klouzavost plynu (gas slippage)
- SCAL (Special Core Analysis)
 - elektrické vlastnosti – FRF (formation resistivity factor), RI (resistivity index)
 - kapilární tlaky (capillary pressure), smáčivost (wettability, oil-wet, water-wet)
 - CEC (cation exchange capacity), vypočten faktor jílovitosti Q_v
 - stlačitelnost (rock compressibility)
 - relativní propustnosti K_o , K_g , K_w
 - injectivity, flow tests



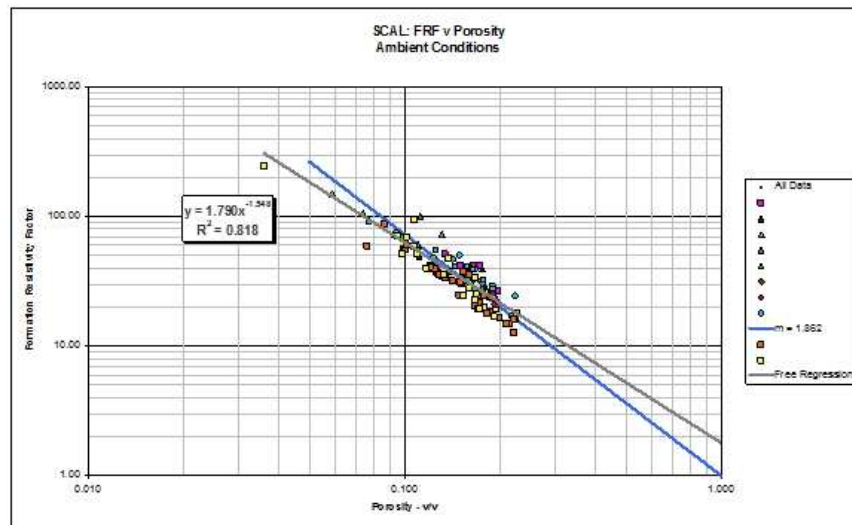
Torsaeter, 2000

Capillary-rise method.

Základy Petrophysics



SCAL data : FRF

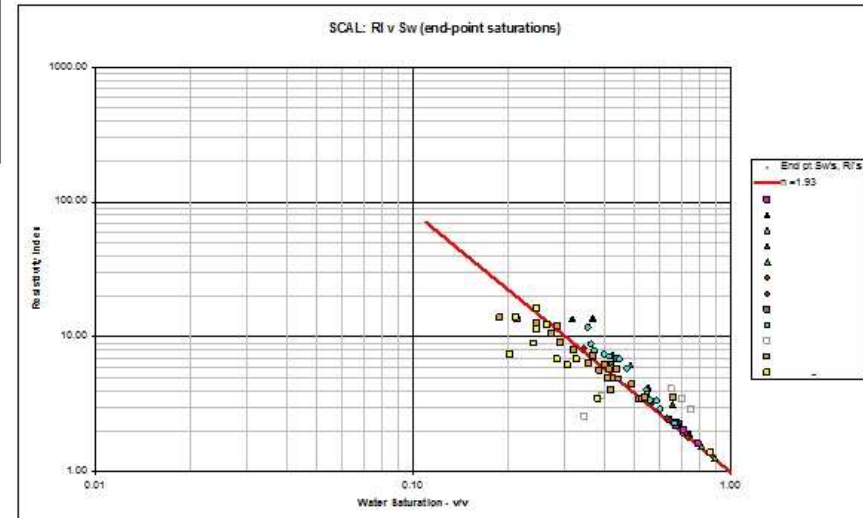


FRF data se používají pro odvození cementačního exponentu m

RI data se používají pro odvození saturačního exponentu n

Laboratorní analýzy elektrických vlastností hornin umožňují odvození parametrů vstupujících do výpočtů saturace.

SCAL data : RI

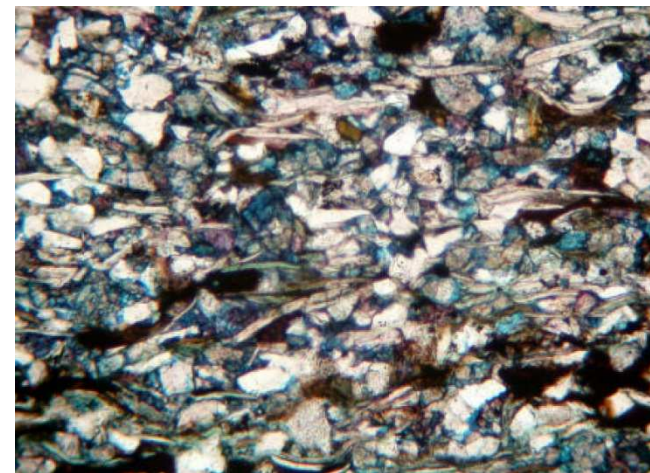
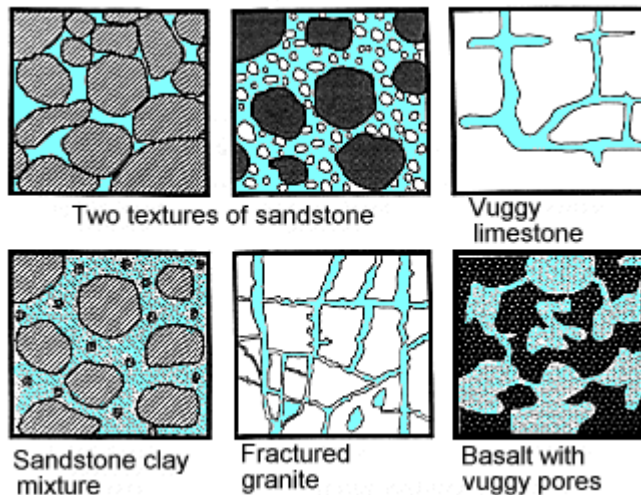


Laboratorní analýzy vrtných jader (Core analysis)

Popis a proměrování vzorků (full size cores, samples, plugs) a výbrusů (thin sections)

- petrografický popis, mineralogické analýzy, struktura pórů, textura, heterogenita, sedimentologická charakteristika (geneze, konsolidace)
 - XRD (X-Ray diffraction)
 - XRF (X-Ray fluoroscopy)
 - SEM (scanning electron microscopy)
 - CT scanning – celých vrtných jader

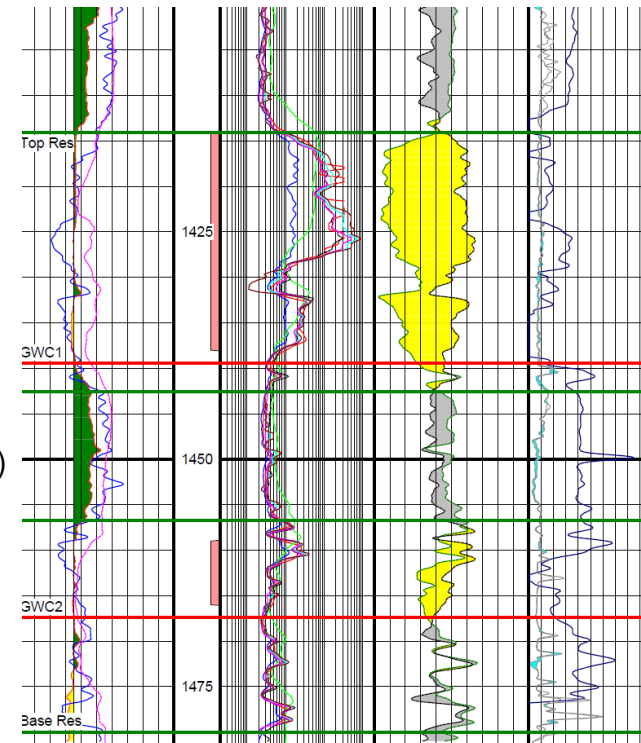
Thin section



Interpretace petrofyzikálních dat

Shromáždění dat (data gathering)

- karotážní data vč hlaviček karotogramů
 - souřadnice vrtu, interval měření, vlastnosti výplachu, průměr díla, zaznamenaná teplota
- údaje z Geoservisů (mudlog)
 - rozbor výplachu, popis vrtných úlomků (cuttings), prvotní profil vrtu (composite log)
- závěrečná zpráva vrtu (FWR – final well report)
- inklinometrická data (directional survey), KB/RT elevation
- údaje o jádrování
 - jádrované intervaly
 - výnos jádra (recovery ratio)
- laboratorní analýzy jader, petrografický popis jader
- parametry a výsledky analýz ložiskových fluid
 - hustota, viskozita, stupeň rozpuštěného plynu (GOR – gas-oil ratio)
 - měrný elektrický odpor vrstevních vod R_w
 - mineralizace a chemické složení vrstevních vod
- teplotní a tlaková data ložiska (reservoir temperature & pressure data)
- výsledky testů a intervaly stávající perforace
- geologický popis ložiska vč hloubek vyčleněných horizontů (tops)
- výsledky předešlých studií a vyhodnocení ložiska



Se shromážděných dat se vytvoří příslušné databáze, odvodí potřebné parametry.

Základy Petrophysics



FILE NO: K151		COMPANY KUWAIT OIL COMPANY	
API NO: FIELD PRINT		WELL BG-	
		FIELD BURGAN	
		RIG NAME BWD-1	
		COUNTRY KUWAIT	
Ver. 4.05		LOCATION:	
SCALE: 1:500 1:200		E: 7 2 M N: 3, 8 M	
		OTHER SERVICES DSL BHP RCI	
PERMANENT DATUM MSL ELEVATION 0 FT		ELEVATIONS:	
LOG MEASURED FROM KBE 6 FT ABOVE P.D.		KB 6 FT	
DRILL. MEAS. FROM KBE		DF 5 FT	
		GL 6 FT	
DATE		13-	
RUN TRIP		1 1 2 1	
SERVICE ORDER		606 606	
DEPTH DRILLER		64 FT 64 FT	
DEPTH LOGGER		65 FT 57 FT	
BOTTOM LOGGED INTERVAL		63 FT 54 FT	
TOP LOGGED INTERVAL		30 FT 0 FT	
CASING DRILLER		13.375 IN @ 32 FT 13.375 IN @ 32 FT	
CASING LOGGER		30 FT 30 FT	
BIT SIZE		12.25 IN 12.25 IN	
TYPE OF FLUID IN HOLE		KCL POLYMER MUD KCL POLYMER MUD	
DENSITY VISCOSITY		10.6 LB/G 47 CP 10.6 LB/G 47 CP	
PH FLUID LOSS		10 3 C3 10 3 C3	
SOURCE OF SAMPLE		FLOWLINE FLOWLINE	
RM AT MEAS. TEMP.		0.30 OHMM @ 75 DEGF 0.29 OHMM @ 75 DEGF	
RMF AT MEAS. TEMP.		0.21 OHMM @ 75 DEGF 0.21 OHMM @ 75 DEGF	
RMC AT MEAS. TEMP.		0.49 OHMM @ 75 DEGF 0.49 OHMM @ 75 DEGF	
SOURCE OF RMF RMC		MEASURED MEASURED MEASURED MEASURED	
RM AT BHT		0.17 OHMM @ 30.6 DEGF 0.17 OHMM @ 30.7 DEGF	
TIME SINCE CIRCULATION		11 HOURS 16.5 HOURS	
MAX. RECORDED TEMP.		30.6 DEGF 30.7 DEGF	
EQUIP. NO. LOCATION		HL-6762 KUWAIT HL-6762 KUWAIT	
RECORDED BY		LOUJAIN CHEHAITLY LOUJAIN CHEHAITLY	
WITNESSED BY		MR. SINGH MR. SINGH	

Hlavička karotogramu (log header records)

měřené metody

společnost, vrt, pole, vrtná souprava

souřadnice vrtu

výšky, referenční úroveň

měřený interval, pořadí záměrů

údaje o patě pažnice (casing shoe)

údaje o výplachu

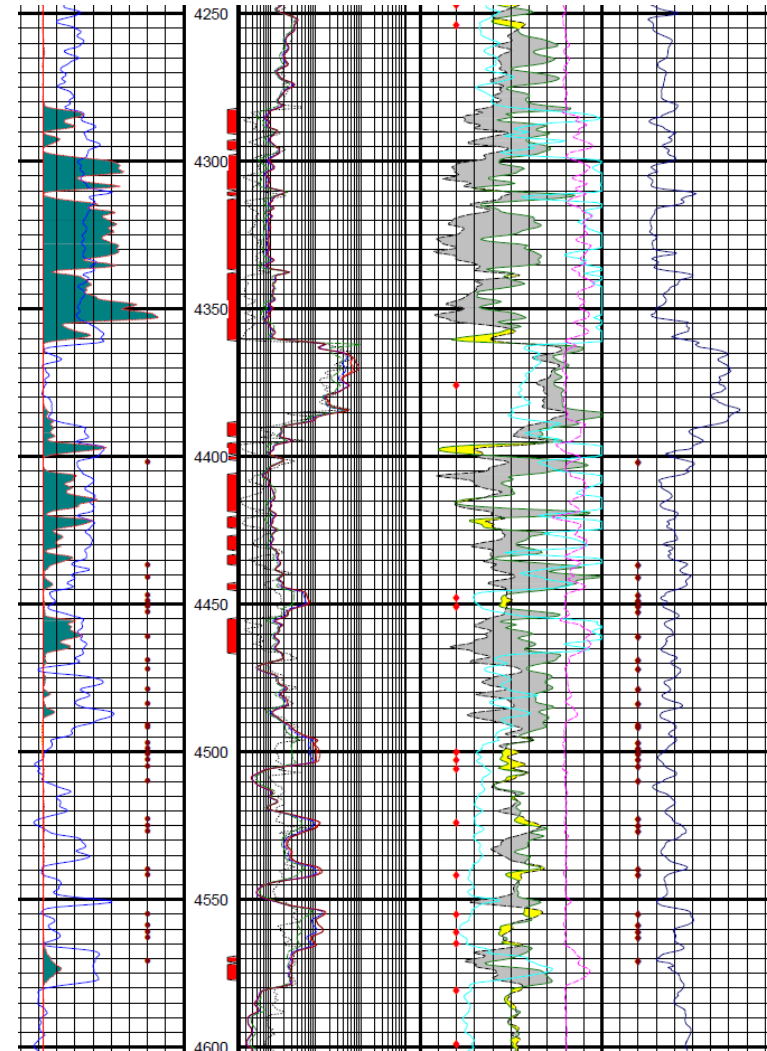
odpovědné osoby

Interpretace petrofyzikálních dat

Kontrola dat (data QC – quality control)

- spojení jednotlivých záměrů do jedné křivky (spliced, merged logs)
- oprava hloubkových posunů (depth matching) – týká se i laboratorních měření na jádrech
- oprava nedůvěryhodných úseků křivek (log edit)
- vytvoření indikátoru nevhodného průběhu vrtu s dopadem na kvalitu karotážních dat (bad hole flag)

Takto upravená data vstupují do další etapy petrofyzikální interpretace (raw data vs edited data, prefix DS).

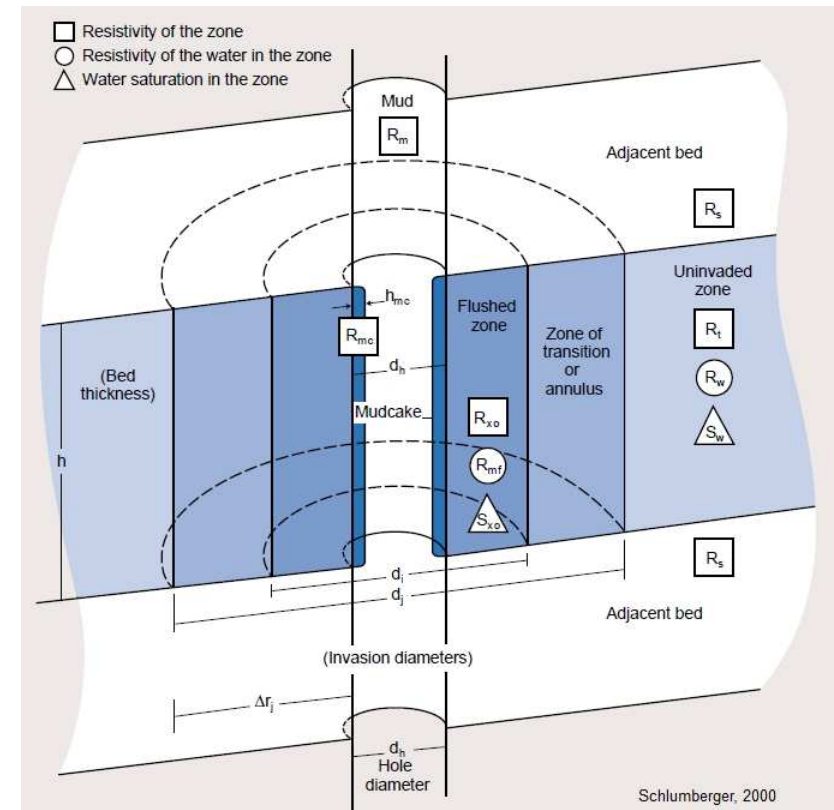


Interpretace petrofyzikálních dat

Oprava dat na vliv prostředí (Environmental corrections)

- opravy jsou definovány v nomogramech pro příslušné nářadí (Schlumberger, Halliburton, Baker Atlas etc.)
- běžné opravy karotážních dat:
 - GR, Den – průměr vrtu a hustota výplachu
 - Neut – průměr vrtu, jílovitá kůrka (mud cake), hustota a salinita výplachu, tlak a teplota prostředí, odstup od stěny vrtu (stand-off)
 - odporové metody – průměr vrtu, odpor výplachu
 - výpočet R_t – opravy na průnik výplachu
- běžné opravy analýz na jádrech:
 - efektivní horizontální tlak (stress corrected)
 - přítomnost jílu (clay bound water corrected)
 - propustnost na ložiskovou vodu (brine corrected)

Takto upravená karotážní data vstupují do další etapy zpracování dat (suffix C – SC, CBWC, BC).

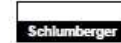


Základy Petrophysics

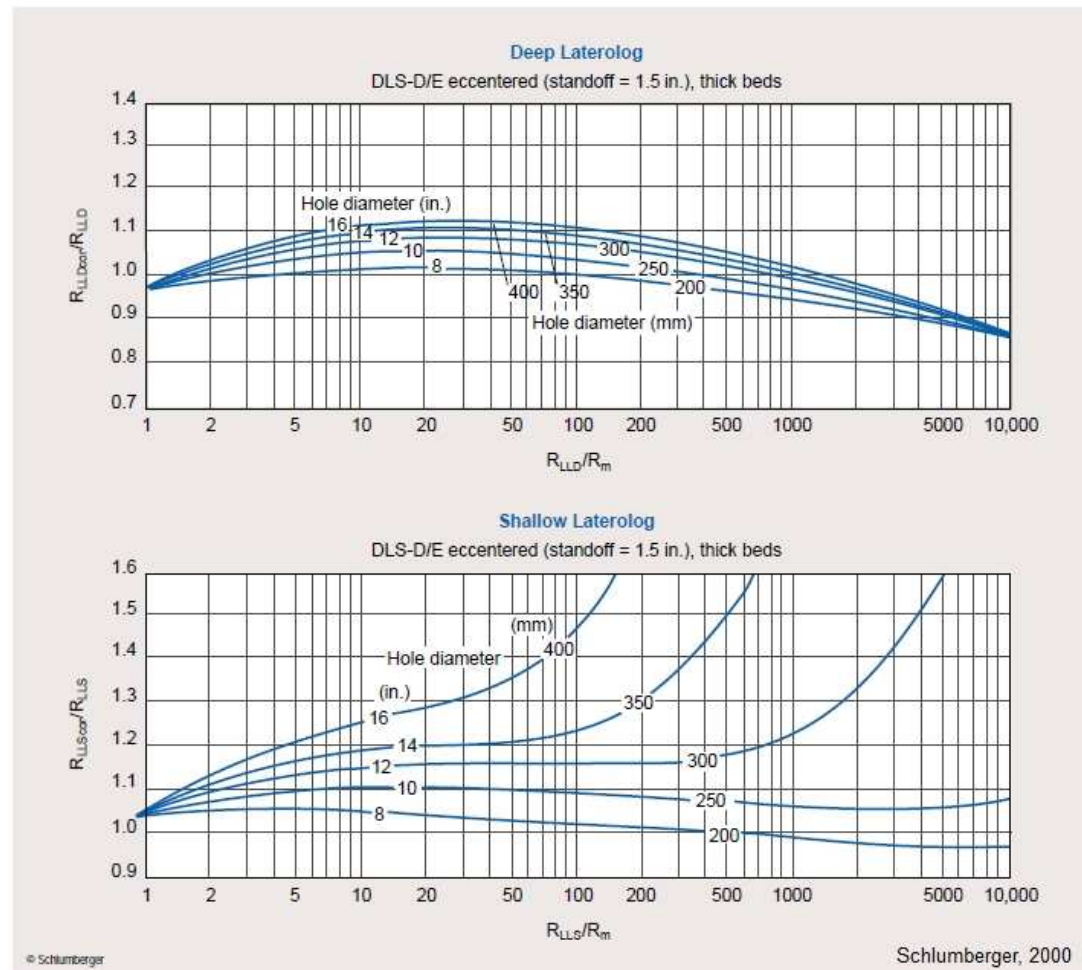


Resistivity

Dual Laterolog (D/E) Borehole Correction



Rcor-2c



Základy Petrophysics

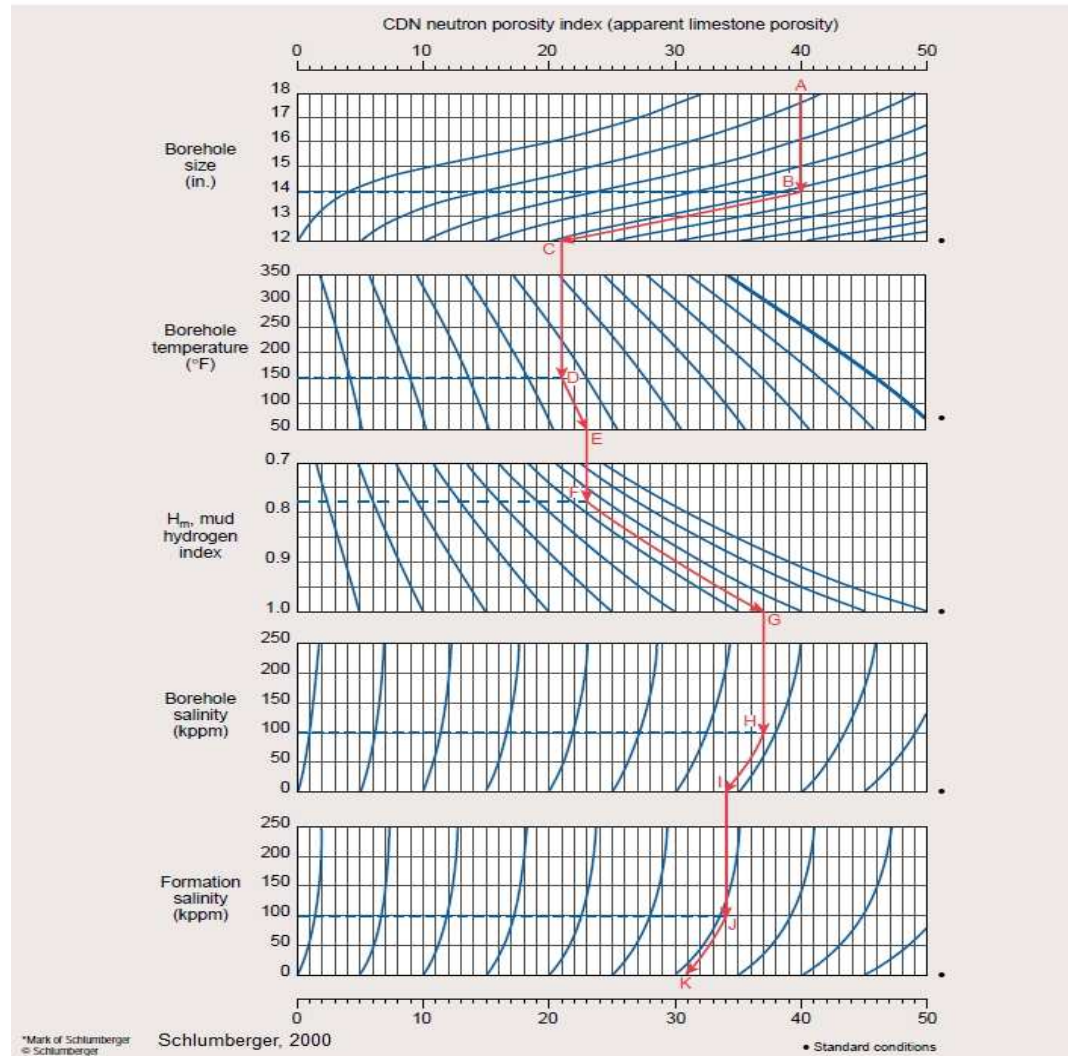


Porosity

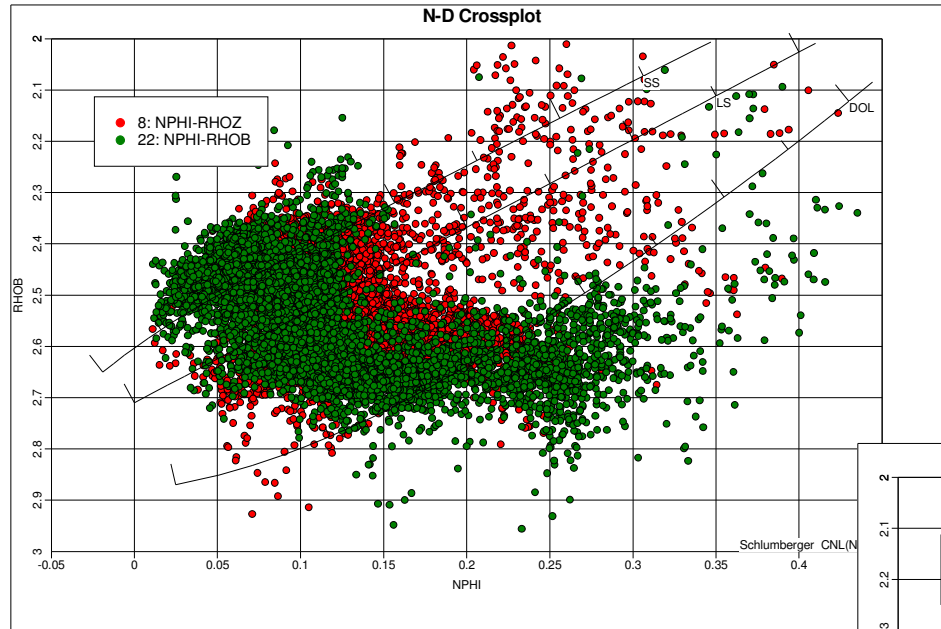
CDN* Compensated Density Neutron Log
Correction Nomograph for 8-in. Tool
14-in. borehole

Schlumberger

Por-24d

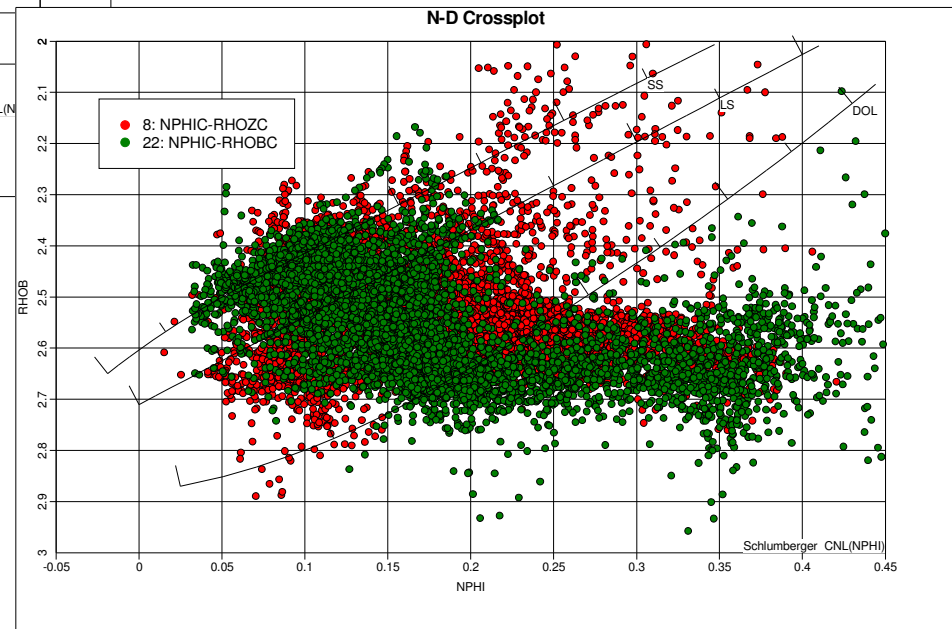


Základy Petrophysics



Data_raw

Data_envi_corr



Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

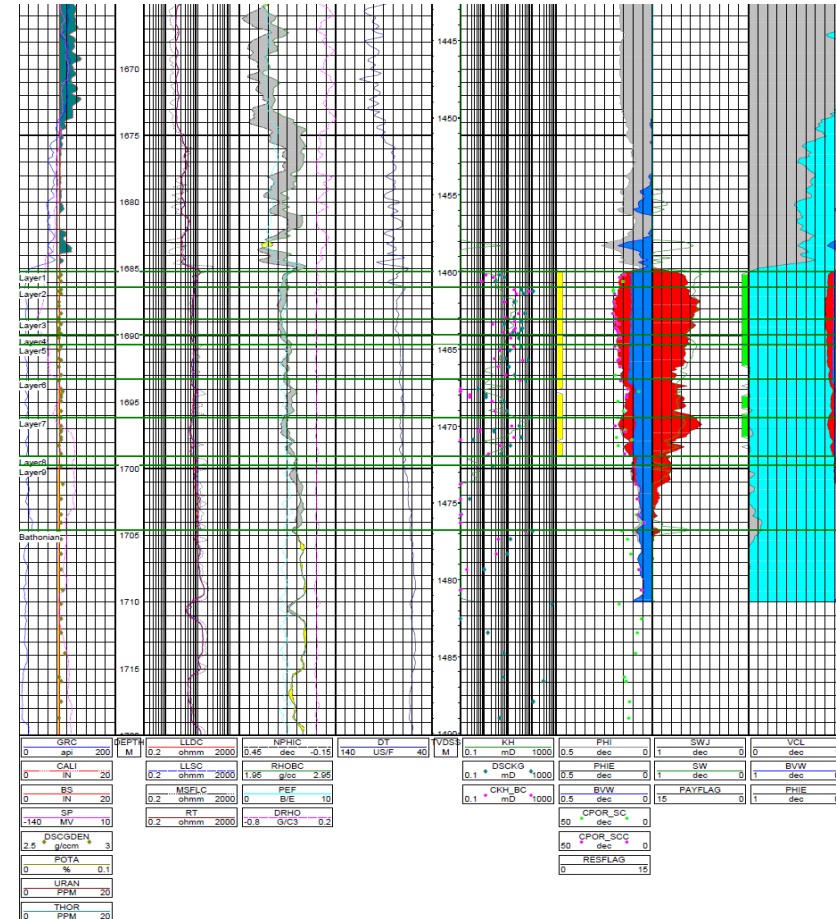
Kvalitativní interpretace

- vyčlenění ložiska (top, base, gross interval – MD, TVD, TVDSS)
- identifikace kontaktů (GOC, OWC, GWC)
- odhad kolektorských vlastností (very good, good, moderate, poor, tight)
- posouzení litologie, stratigrafie (clastics, carbonates, anhydrite, coal, salt, cemented zone, shaly zone, cap/sealing rock)

- semikvantitativní indikátor HC : $\frac{Rt}{Ro} > 4$

Kvantitativní interpretace

- stanovení kolektorských vlastností ložiska
 - jílovitost (shaliness, shale - clay volume)
 - porozita (total, effective porosity)
 - vodonasyacení (water saturation, SW(Ht))
 - propustnost (permeability horizontal / vertical)

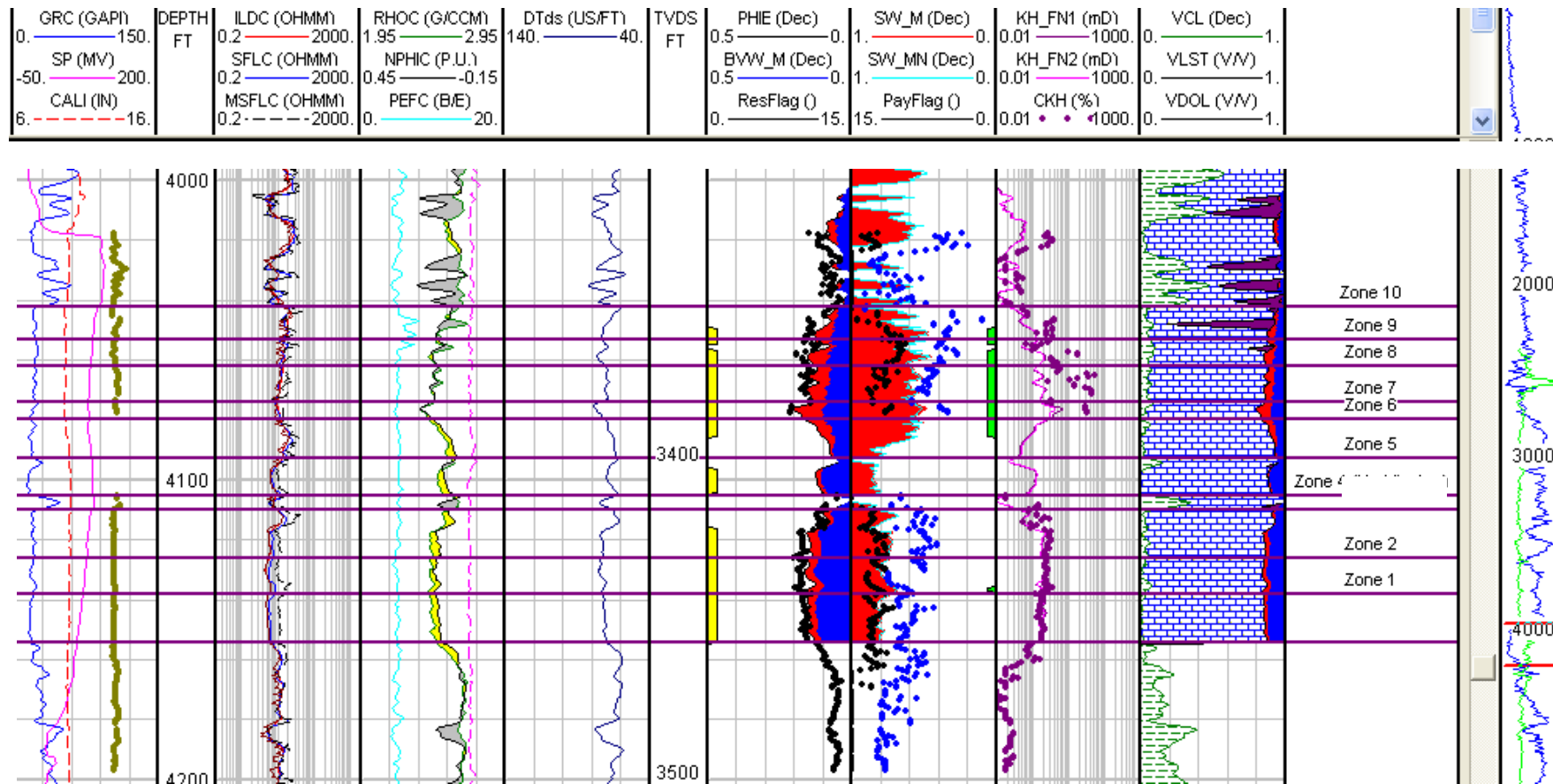


- ložiskové intervaly (net reservoir, net pay)
- kolektorské jednotky (HU, FZI, rock types)
- složení matrix (VSS, VLIM, VDOL, ...)

Základy Petrophysics



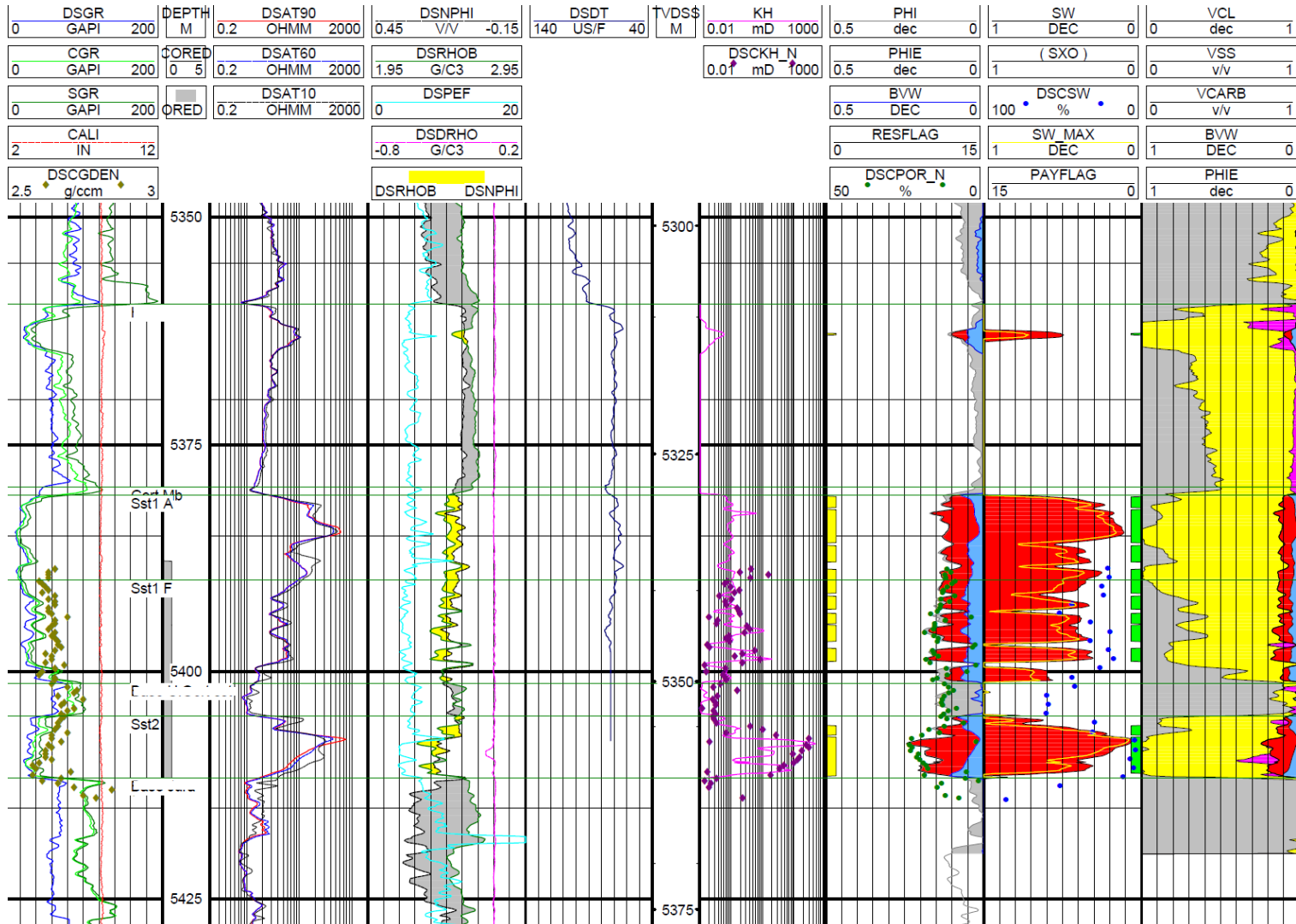
CPI logplot



Základy Petrophysics



CPI logplot



Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

Jílovitost (VSH, VCL)

- jílovitostní indikátory jsou samostatné křivky GR, SP, Th, Neut, Rt

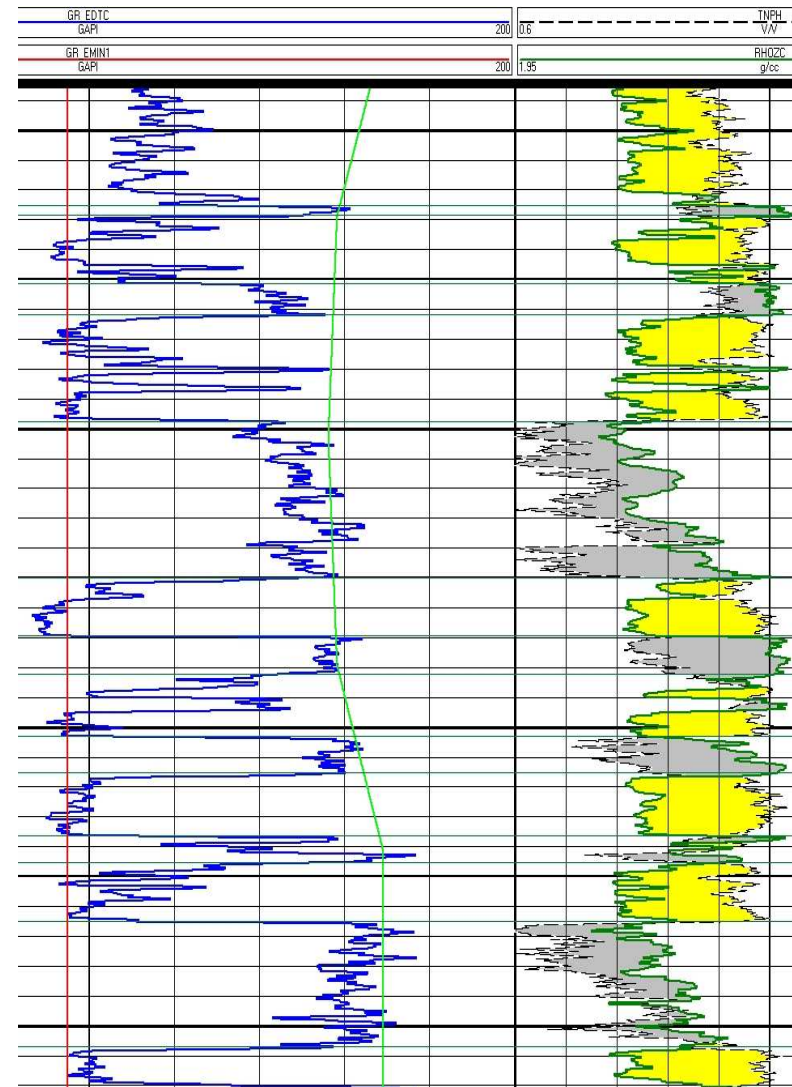
základní vztahy (existuje mnoho vzorců a postupů):

$$VSH = \frac{GR - GR_{ma}}{GR_{sh} - GR_{ma}}$$

kde GR – měřená hodnota GR [gapi]
GR_{ma} – gama aktivita čistých písků [gapi]
GR_{sh} – gama aktivita jílu [gapi]

$$VSH = \left(\frac{R_{cl} \cdot (R_{ma} - R_t)}{R_t \cdot (R_{ma} - R_{cl})} \right)^{1/b}$$

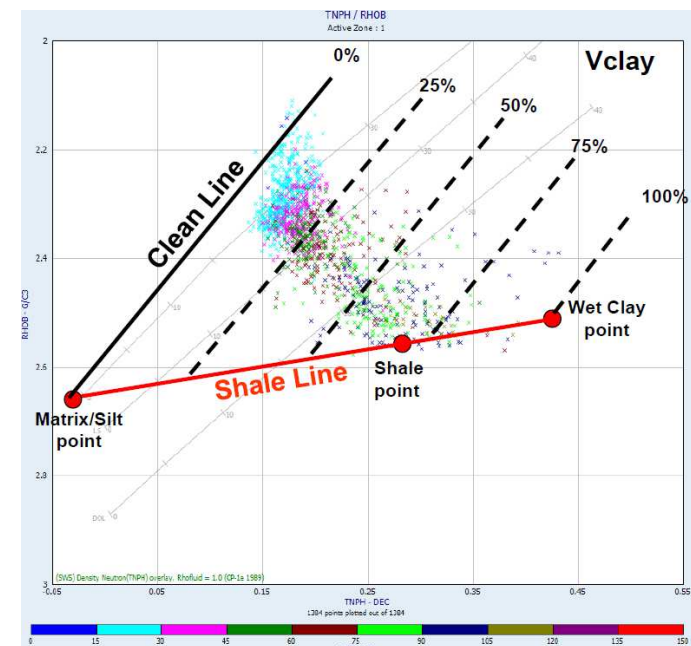
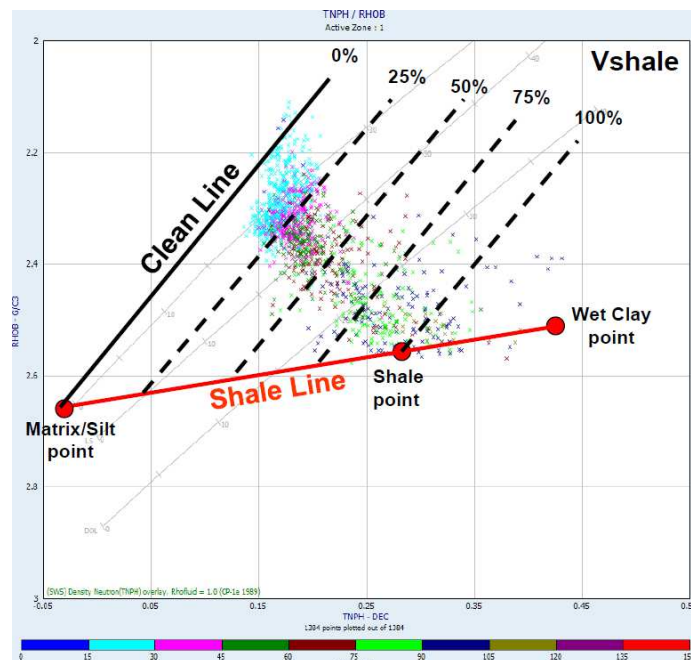
kde Rt – měřené Rt [ohmm]
R_{ma} – resistivita čisté matrice [ohmm]
R_{cl} – resistivita jílu [ohmm]
1/b – empirický exponent
b = 2 pro poměr [0.0 < R_{cl}/R_t < 0.5]
b = 1 pro poměr [0.5 <= R_{cl}/R_t < 1.0]



Interpretace petrofyzikálních dat

Jílovitost (VSH, VCL)

- Neut-Den křížový graf (N-D crossplot) je definována clean (matrix) line, shale a clay point.



Interpretace petrofyzikálních dat

Porozita (PHIT, PHIE)

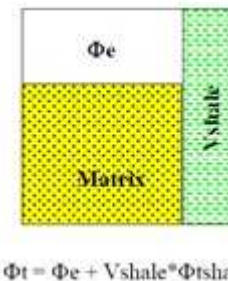
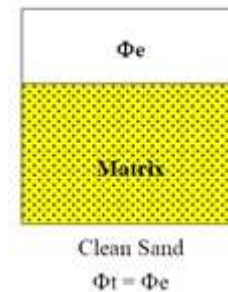
- Konvenční porozitní metody jsou density, neutron a sonic.
- V čistých kolektorech $PHIT = PHIE$
- Pro výpočet efektivní porozity v jílovitých kolektorech musí být provedena oprava na přítomnost jílu.

$$PHIE = PHIT - VSH * PORsh$$

kde PHIE – efektivní porozita PORsh – porozita jílu
PHIT – celková porozita VSH – objem jílu

Existují ložiska (firemní postup), kde se uplatňuje pouze koncept PHIT.
Tento přístup však přináší problémy a nepřesnosti.

!!! Vždy je výhodné použít pro ložiskovou studii koncept PHIE !!!



Interpretace petrofyzikálních dat

Základní vzorce pro výpočet PHI

- z hustotní karotáže

$$PHI = \frac{RHOMA - RHOB}{RHOMA - RHOfL}$$

- kde
- RHOMA – hustota matrice [g/cm³]
 - RHOB – naměřená hustota (bulk density) [g/cm³]
 - RHOfL – hustota fluid (fluid density) [g/cm³]

- z neutronové karotáže

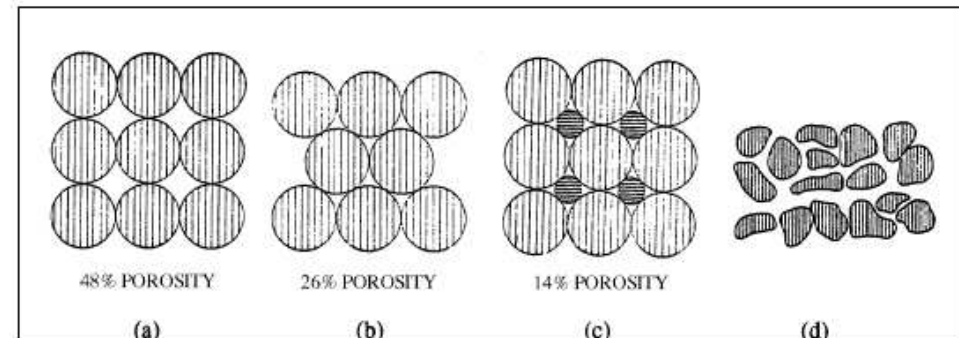
$$PHI = \frac{NPHI - VSH * NPHIsh}{HI}$$

- kde
- NPHI – naměřená neutronová porozita [pu]
 - VSH – objem jílu [v/v]
 - NPHIsh – neutronová porozita jílu [pu]
 - HI – vodíkový index

- z akustické karotáže

$$PHI = \frac{DT - DTma}{DTfl - DTma} \cdot \frac{1}{Cp}$$

- kde
- DT – naměřený průběhový čas [us/ft]
 - DTma – průběhový čas matrice [us/ft]
 - DTfl – průběhový čas fluid [us/ft]
 - Cp – faktor kompakce Wyllie vzorce



Torsaeter, 2000

Cubic packing (a), rhombohedral (b), cubic packing with two grain sizes (c), and typical sand with irregular grain shape (d).

Interpretace petrofyzikálních dat

Porozita (PHIT, PHIE)

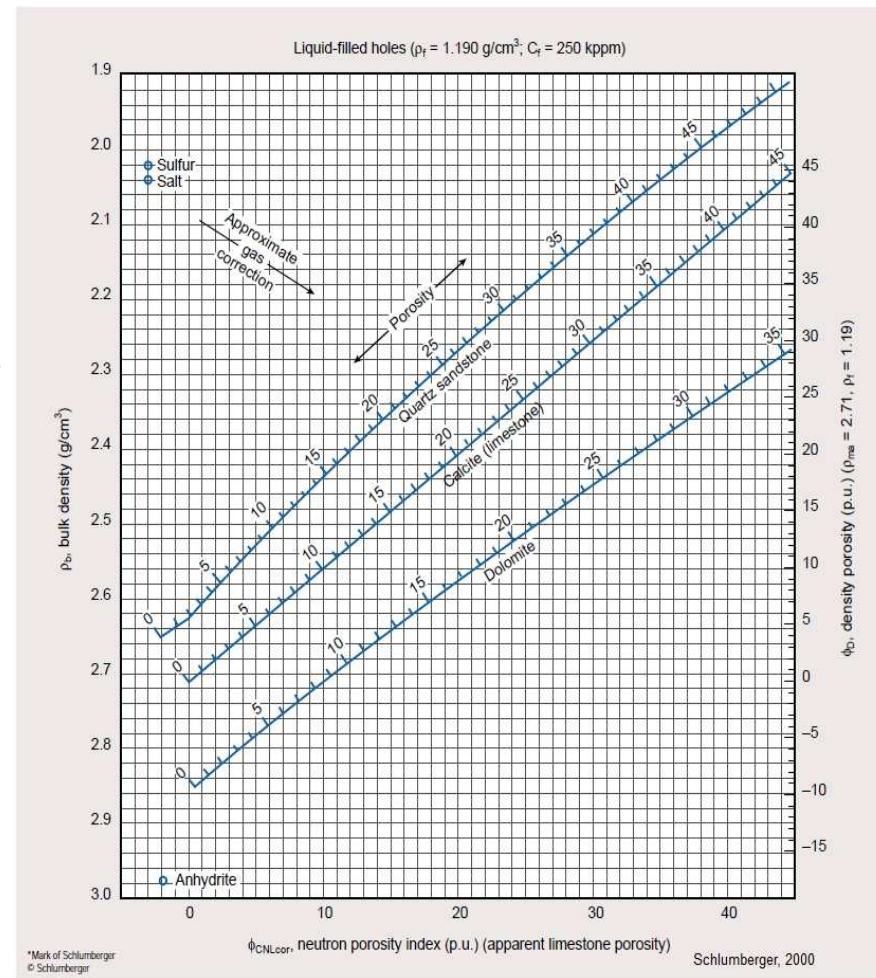
- Neut – Den křížový graf (N-D crossplot) - jde o iterativní techniku, která v sobě zahrnuje opravu na přítomnost uhlovodíků, těžkých minerálů
- Jsou hledány hodnoty porozity odpovídající čtení na obou vstupních křivkách.
- Nevyžaduje za vstup hodnoty matrice a fluid. Naopak GDEN [g/cm³] je výstupem.
- Vstupem jsou pouze parametry jílu VSH, RHOsh, NPHIsh.

Crossplots for Porosity, Lithology and Saturation

Porosity and Lithology Determination from
Litho-Density* Log and CNL* Compensated Neutron Log
For CNL curves after 1986 labeled TNPH

Schlumberger

CP-11



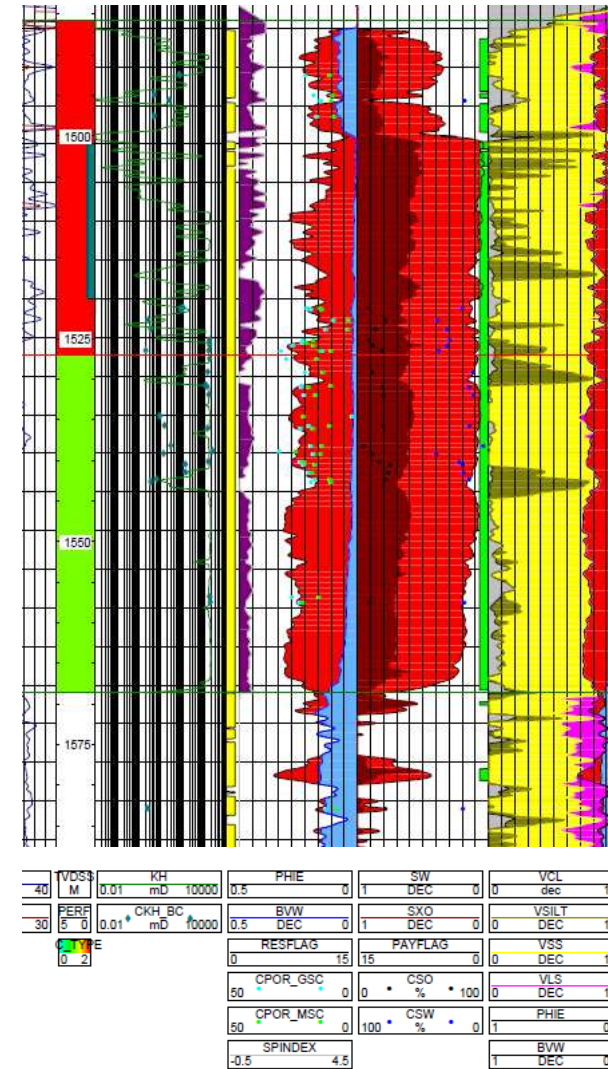
Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

Nasycení vodou (Water saturation SW)

- Konvenční metodou pro výpočet SW jsou odporové metody jejichž výstupem je křivka Rt (true resistivity).
- Výpočet saturace vyžaduje znát VSH, PHI a parametry ložiska při dané teplotě.
- Bylo publikováno x set vzorců pro výpočet nasycení vodou. Pro různé typy přítomnosti jílu (laminar, structural, dispersed).
- Základními postupy jsou 2 koncepty založené na:
 - Archiho vztahu (Straight Archie, Indonesian, Simandoux)
 - konceptu dvojí vody (dual water)



Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

- Archieho zákon**

$$FRF = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m}$$

kde FRF – formační faktor (formation resistivity factor)
 Ro – resistivita vrstvy při SW = 100% [ohmm]
 Rw – resistivita vrstevních vod [ohmm]
 φ – porozita [v/v]
 a – empirická konstanta
 m – cementační exponent

Archieho zákon platí pouze v čistých kolektorech.

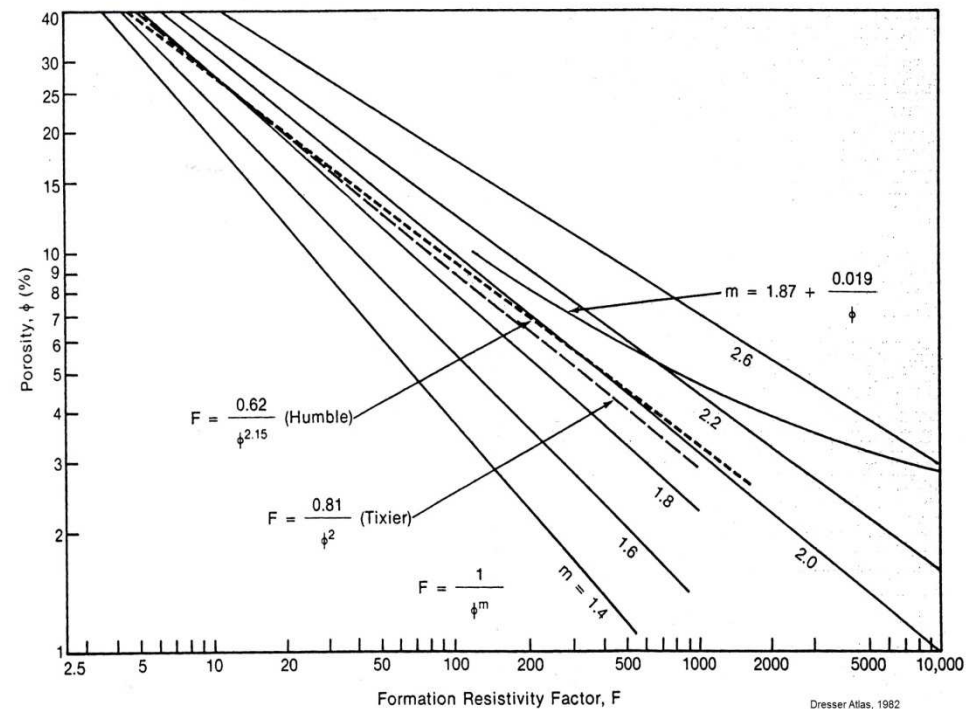
konstanty vhodné pro pískovce

Vzorec	a	m
Archie	1	2
Humble	0.62	2.13
Tixier	0.81	2

- Nasycení vodou SW – Archieho vzorec**

$$SW^n = \frac{R_o}{R_t} = \frac{FRF \cdot R_w}{R_t} = \frac{a \cdot R_w}{\phi^m \cdot R_t} \quad SW = \sqrt[n]{\frac{a \cdot R_w}{\phi^m \cdot R_t}}$$

kde n – saturační exponent (obvykle n = 2)



Dresser Atlas, 1982

Základy Petrophysics



Nasycení vodou SW v jílovitých kolektorech

Vzorce založené na Archieho zákoně

• Indonesian

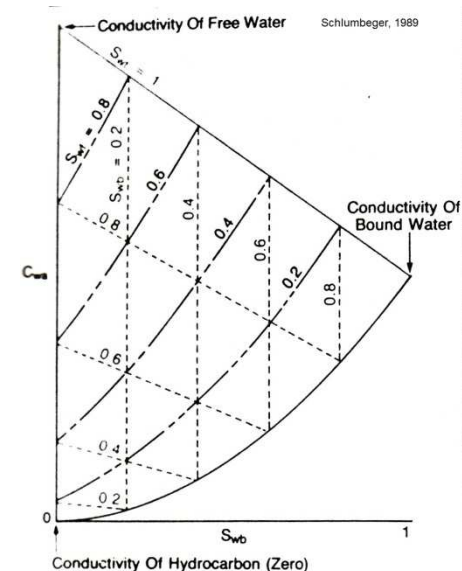
$$S_w = \left[\frac{1}{\frac{R_t^{0.5}}{\frac{V_{sh}^{1-V_{sh}/2}}{R_{sh}^{0.5}} + \frac{\phi^{m/2}}{(a * R_w)^{0.5}}}} \right]^{2/n}$$

• Simandoux

$$S_w = \frac{a * R_w}{2 * \phi^m} \left[\sqrt{\frac{4 * \phi^m}{a * R_w * R_t} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}}} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right]$$

kde Vsh – objem jílu
Rsh – resistivita jílu

- vzorce obsahují opravu na vodivost jílu
- pokud Vsh = 0 výsledek SW je identický s výsledkem SW z přímého Archie vzorce
- Indonesian je vhodný pro klastika
- Simandoux je vhodný pro karbonáty

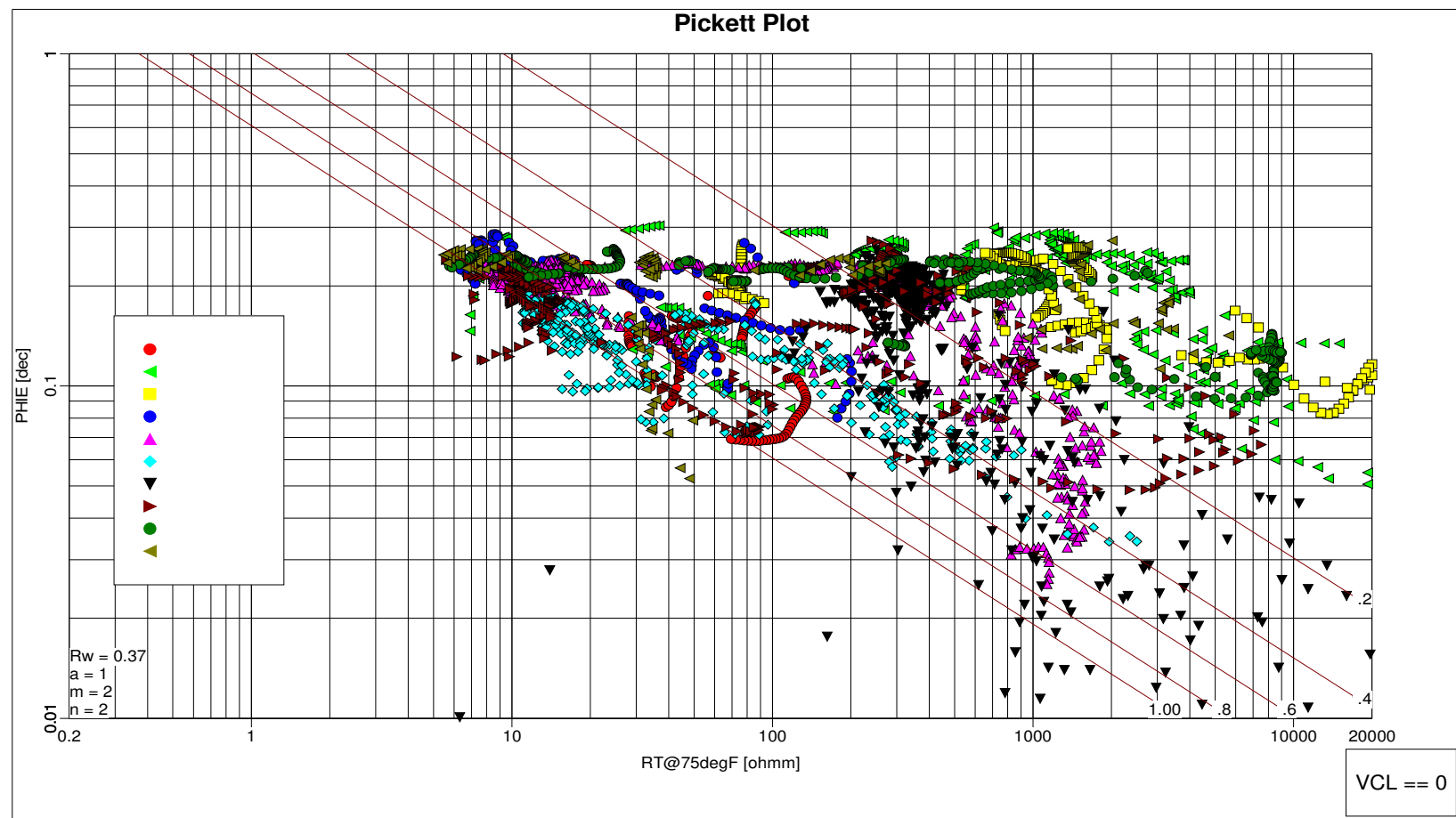


Swb vs Cwa křížový graf
užitý při VOLAN zpracování

Nasycení vodou SW – vzorce založené na Archieho zákoně

Pickett Plot

- logaritmický graf R_t vs PHIE pro posouzení saturace
- je vhodné normalizovat R_t na danou teplotu
- lze definovat vodonosnou přímku a parametry Archieho vzorce



Základy Petrophysics



Nasycení vodou SW v jílovitých kolektorech

Vzorce založené na modelu Dual Water

- **Waxman-Smits**

$$S_w^{n^*} = \frac{R_w}{R_t \phi^{m^*} (1 + R_w \cdot B \cdot \frac{Q_v}{S_w})}$$

- **obecný Dual Water koncept**

$$S_{Wef} = S_{Wt} - S_{Wcbw}$$

kde n^* , m^* – exponenty opravené na přítomnost jílu
 Q_v – jílovitostní koeficient, funkce iontové koncentrace [meq/ml]
 B – faktor iontové vodivosti Na^+ při ložiskové teplotě [mho.cm²/meq]

S_{Wef} – efektivní vodonasycení (free water)
 S_{Wt} – celkové vodonasycení (total)
 S_{Wcbw} – vodonasycení vázané na jílové minerály (clay bound water)

- založen na laboratorním měření CEC, n^* , m^* a vypočteném Q_v – jílovitostní koeficient, funkce iontové koncentrace
- Q_v lze odhadnout i z karotážní V_{sh}
- pro koncept dual-water bylo publikováno mnoho vzorců např. model VOLAN

Dual Water Model

Solids			Fluids		
Matrix	Silt	Dry Clay	Bound Water	Free Water	Hydrocarbons
Matrix	Shale		Effective Porosity		
Total Porosity					

Schlumberger, 1989

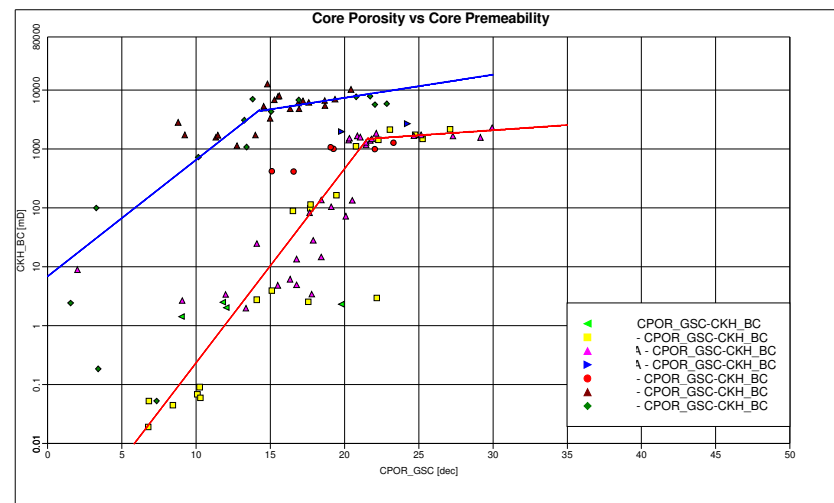
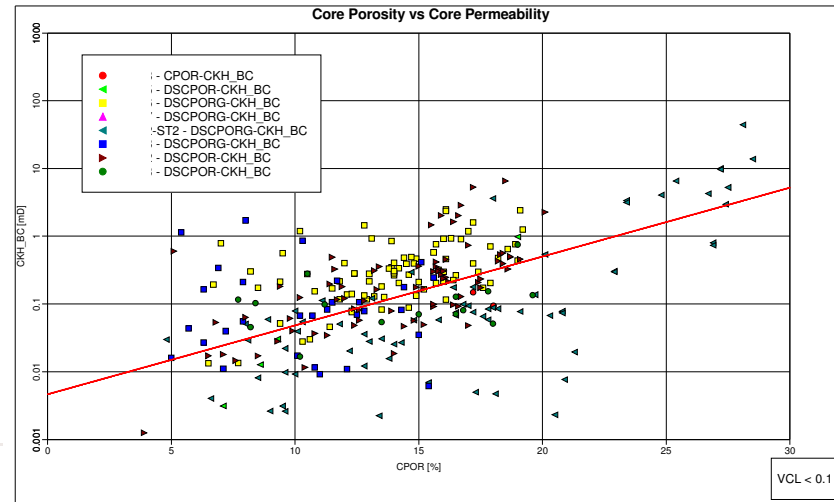
Interpretace petrofyzikálních dat

Propustnost (permeabilita K)

- Propustnost lze odhadnout z karotážních metod NMR a SP, které jsou funkcí permeability.
- Nejpřesnější metodou je modelace K [mD] z analýz CCAL dat (porosity – permeability transform).

$$\log K = a * PHIE - b$$

- CCAL data (POR, K) by měla být opravena z laboratorních podmínek na ložiskové podmínky (např. I. Juhasz., 1986)
- Běžně se zpracovávají KH (KH90), KV a reprezentativní poměr KV/KH



Interpretace petrofyzikálních dat

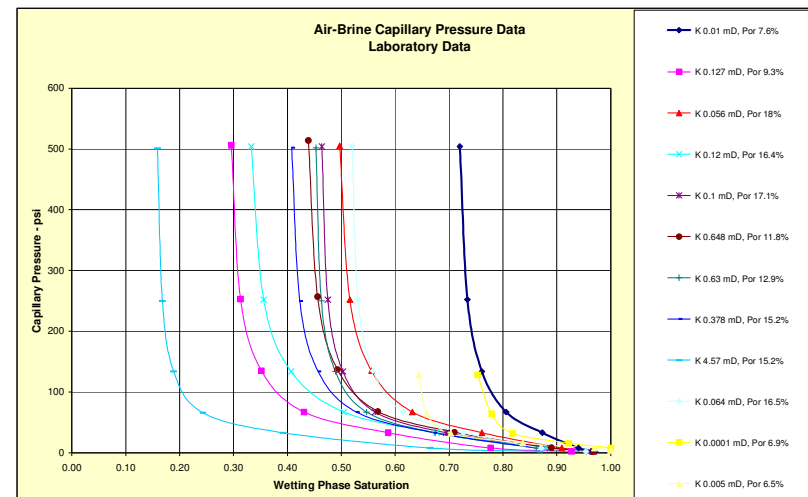
SW(Ht) jako funkce výšky nad kontaktem

- Funkce popisuje vliv kapilárního vztlínání nad kontaktem v původním přirozeném stavu ložiska.
- Reprezentuje přechodovou zónu (transition zone) tedy charakter SW mezi SW=1 na kontaktu HC-voda a neredukovatelným SW (SW irreducible).
- Stanovuje se z laboratorních měření kapilárních tlaků C_p , je nezávislá na SW z karotáže.
- Nejběžnější metody pro modelaci SW(Ht) – Foil funkce, Brooks-Corey, Lambda, Thomeer a Leverett-J funkce.
- SCAL data (POR, K, C_p) by měla být opravena z laboratorních podmínek na ložiskové podmínky (např. I. Juhasz., 1986)

Výška nad kontaktem (Ht) se vztahuje ke kapilárnímu tlaku následujícím standardním vztahem:

$$Ht = 10,19 \cdot \frac{P_{C_{res}}}{\left(\rho_{w_{res}} - \rho_{hyd_{res}} \right)}$$

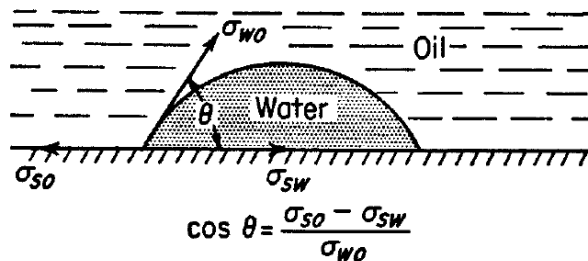
kde Ht výška nad kontaktem [m]
 P_c _ ložiskový kapilární tlak [bar]
 ρ_w _ hustota ložiskové vody [g/ccm]
 ρ_{hyd} _ hustota uhlovodíku HC [g/ccm]



Interpretace petrofyzikálních dat

Modelace SW(Ht) pomocí Leverett-J funkce

- Metodika je založena na standardních principech kapilarity a vztahuje se nejen k výšce nad kontaktem, ale i porositou a propustností.



mezifázové napětí pro systém voda - ropa

SW(Ht) je definována takto:

$$S_w = \left[\frac{3,162 \cdot \sqrt{\frac{Kh}{\Phi}} \cdot Ht \cdot (P_{w,res} - P_{hyd,res})}{10,19 \cdot a \cdot \sigma_{,res} \cdot \cos(\vartheta_{,res})} \right]^{\frac{1}{b}}$$

- kde
- Kh - propustnost [mD]
 - Φ - porozita [dec]
 - Ht - výška nad kontaktem [m]
 - P_{w,res} - hustota ložiskové vody [g/ccm]
 - P_{hyd,res} - hustota uhlovodíku in-situ [g/ccm]
 - σ_{,res} - mezifázové napětí [dyne/cm]
 - θ_{,res} - kontaktní úhel uhlovodík-voda v ložisku [stupeň]
 - a, b - konstanty reflektující vztah mezi S_w and J(S_w)

Interpretace petrofyzikálních dat

Modelace SW(Ht) pomocí Leverett-J funkce

J function $J(S_w)$ je počítána jako:

$$J(S_w) = 3,162 \cdot \sqrt{\frac{Kh}{\Phi}} \cdot \frac{P_{c, res}(S_w)}{\sigma_{, res} \cdot \cos(\vartheta, res)}$$

kde $P_{c, res}(S_w)$ - je ekvivalent kapilárního tlaku za ložiskových podmínek

$$P_{c_{res}} = \frac{\sigma_{res} \cdot \cos(\theta_{res})}{\sigma_{lab} \cdot \cos(\theta_{lab})} \cdot P_{c_{lab}}$$

kde P_c - kapilární tlak [bar nebo psi]
 σ - mezifázové napětí [dyne/cm]
 θ - kontaktní úhel pórových fluid [stupeň]

přípona *res* indikuje hodnotu za ložiskových podmínek
lab indikuje hodnotu za laboratorních podmínek

Konstanty 'a' a 'b' ve vzorci SW(Ht) jsou definovány regresní analýzou saturací smáčivé fáze laboratorních vzorků a ekvivalentu Leverett J funkce všech validních dat.

Tento vztah je následující:

$$J(S_w) = a \cdot S_w^b$$

kde S_w - naměřené nasycení smáčivé fáze na vzorcích

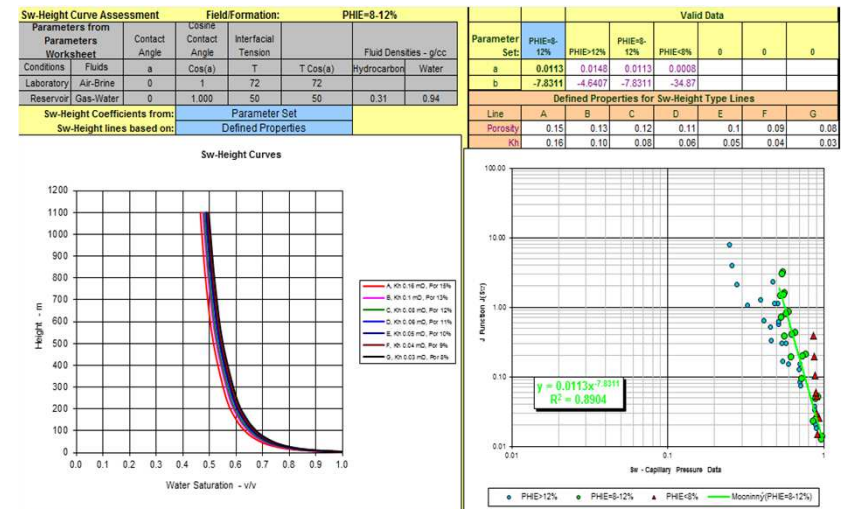
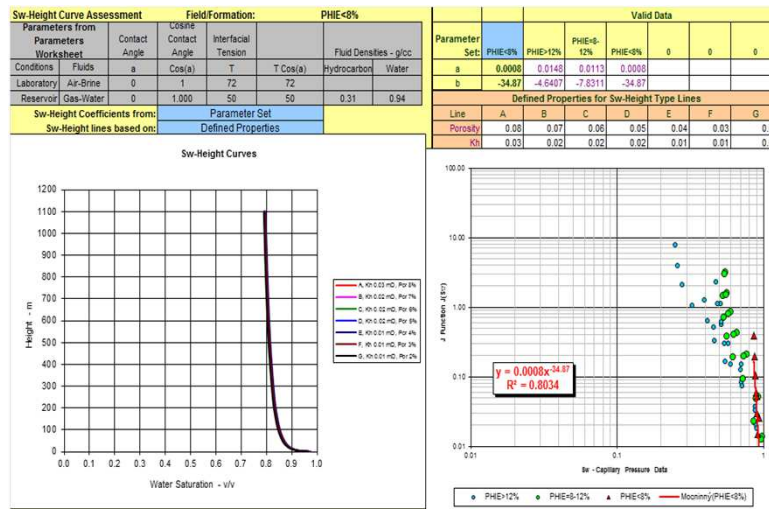
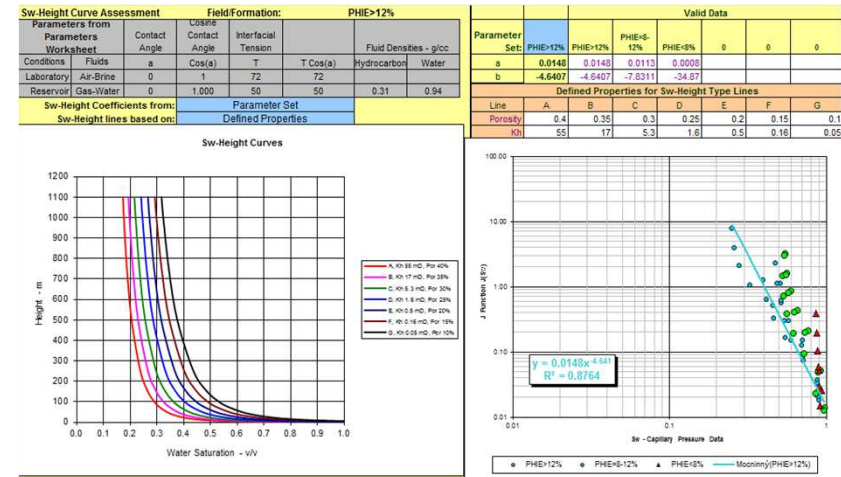
Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

Modelace SW(Ht) pomocí Leverett-J funkce

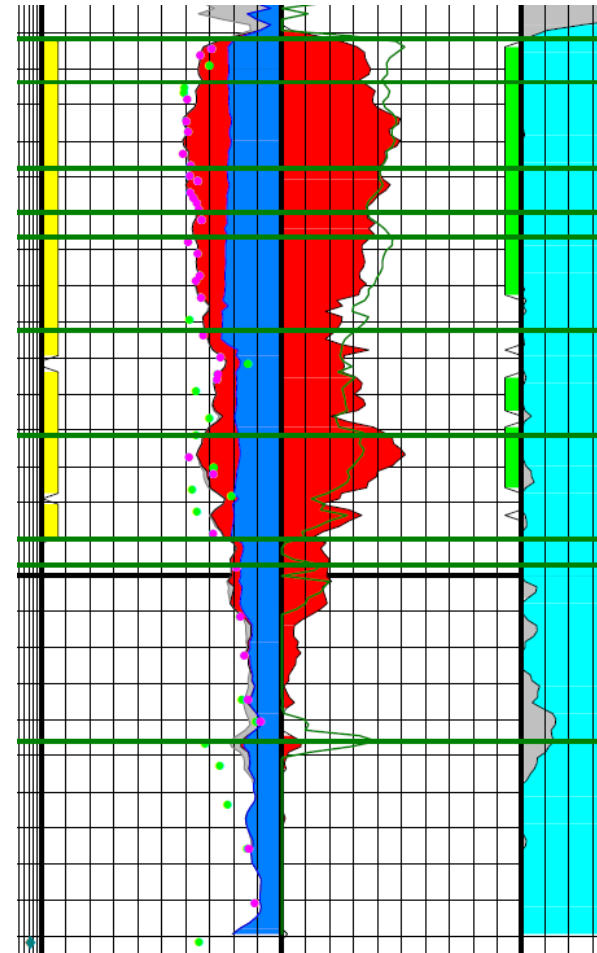
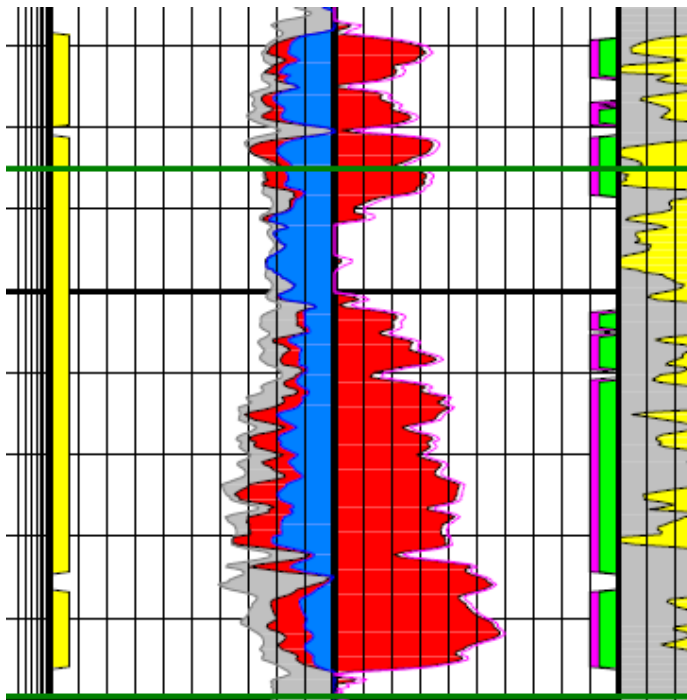
- SW(Ht) je výsledek výšky kapilárního vztlínání nad kontaktem
- SW (Ht) klesá se zvyšující se kvalitou kolektoru.



Interpretace petrofyzikálních dat

Modelace SW(Ht) pomocí Leverett-J funkce

- Křivka výsledné SW(Ht) je porovnána s křivkou SWlog.



Interpretace petrofyzikálních dat

Vyčlenění horninových typů (rock typing)

- Horninový typ (rock type, hydraulic unit) charakterizuje společné vlastnosti ložiskové horniny, zejména s přihlédnutím na pohyb fluid a skladovací kapacitu horniny (storage capacity).
- Horninové typy mohou být vyčleněny na základě kvalitativního posouzení distribuce propustnosti a porosity, nejčastěji PHI vs KH.
- Lze užít kvantitativní postupy založené na
 - RQI (rock quality index)
 - FZI (flow zone indicator)
- Jsou analyzována CCAL data. Po vyčlenění horninových typů jsou postupy aplikovány na výsledky karotážní interpretace – EF (electro facies).

CCAL > rock types > log data
- Uplatnění rock types na výsledky karotáží je obtížná úloha (faciální modely, multi-lineární regrese, neural networks).

Vzorce

Normalized porosity

$$PHIZ = \frac{PHI}{1 - PHI}$$

[dec]

Reservoir Quality Index

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{PHI}}$$

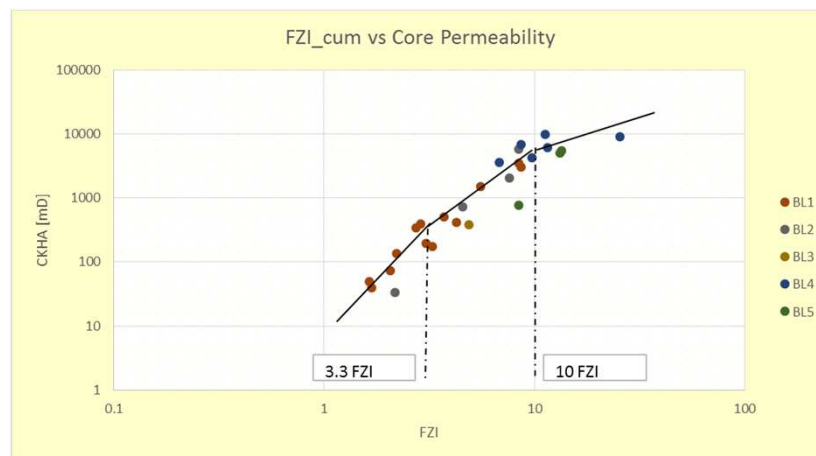
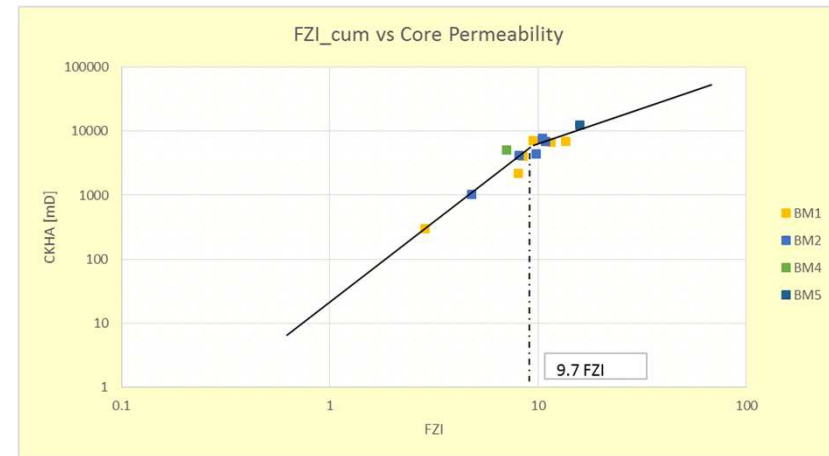
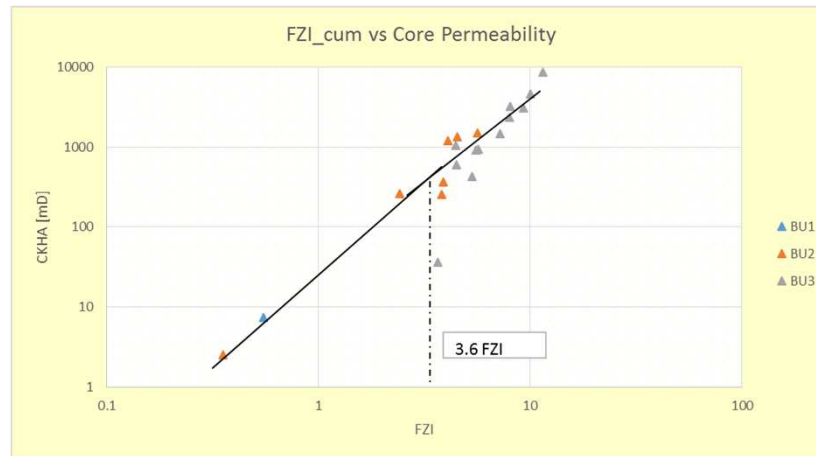
[um, mD, dec]

Flow Zone Indicator

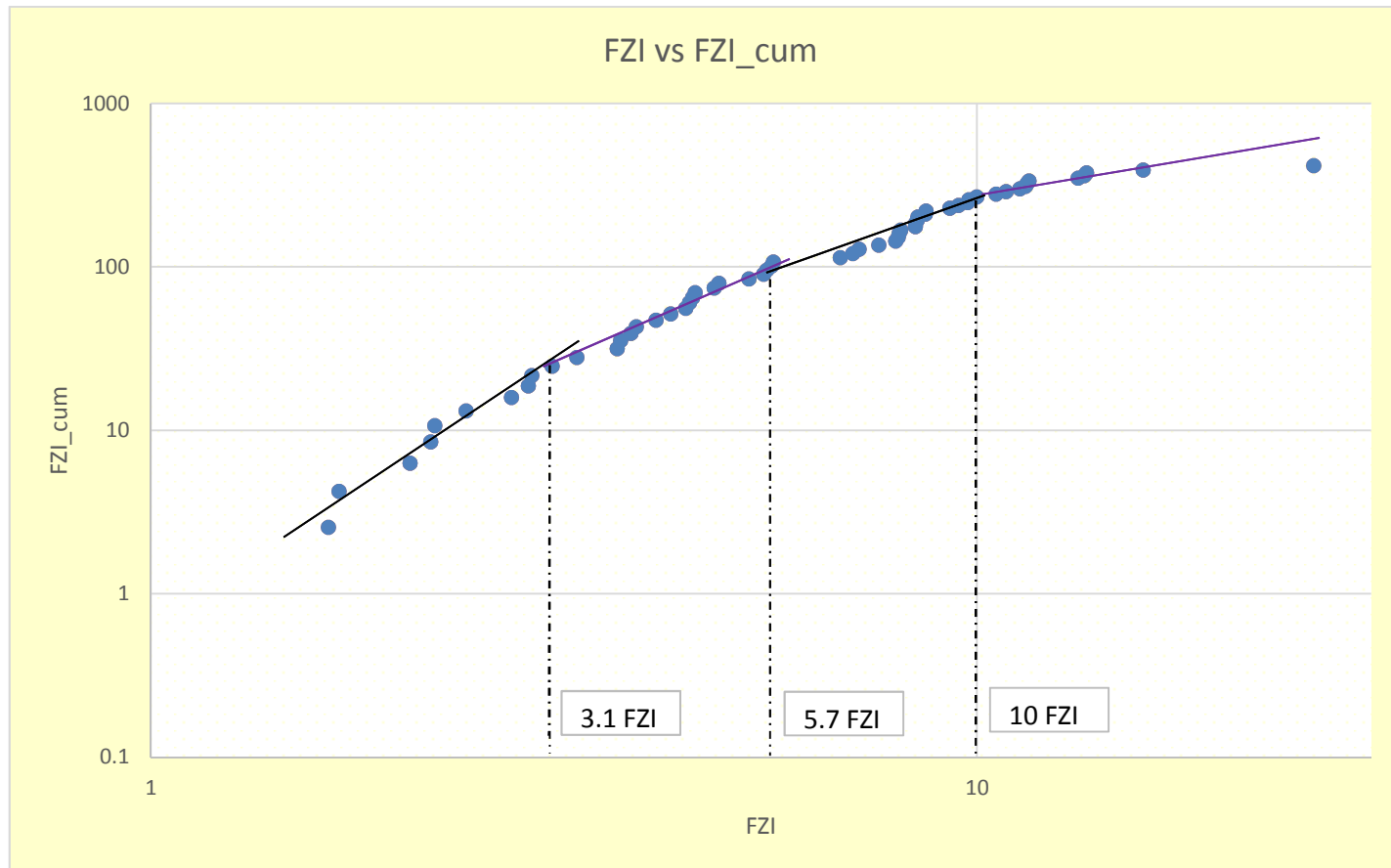
$$FZI = \frac{RQI}{PHIZ}$$

[um, um, dec]

Základy Petrophysics



Základy Petrophysics



vyčleněny 4 HU (rock types)

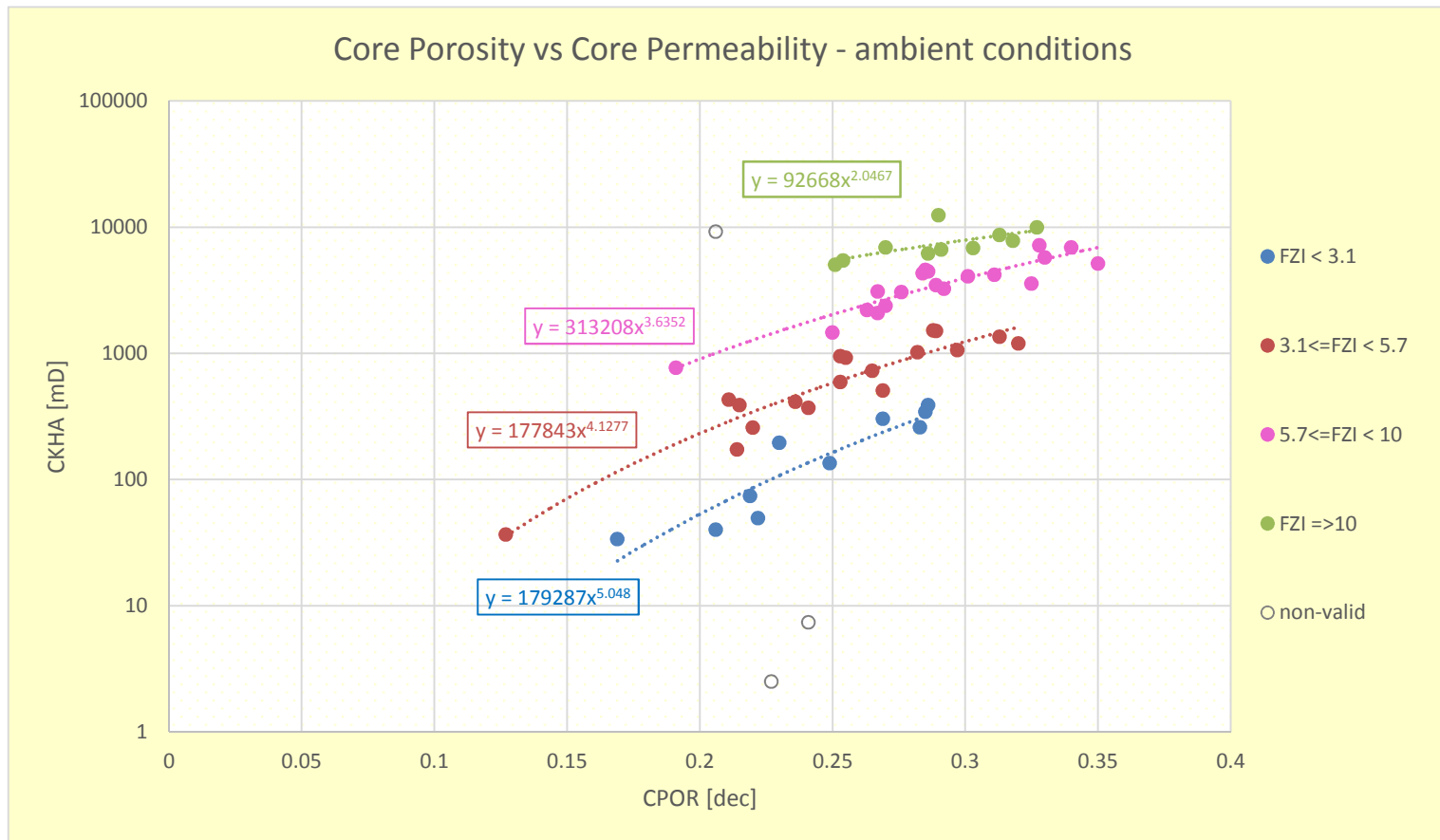
$FZI < 3.1$

$3.1 \leq FZI < 5.7$

$5.7 \leq FZI < 10$

$FZI \geq 10$

Základy Petrophysics



identifikovány 4 trendy CPOR vs CKH

FZI < 3.1

3.1 ≤ FZI < 5.7

5.7 ≤ FZI < 10

FZI ≥ 10

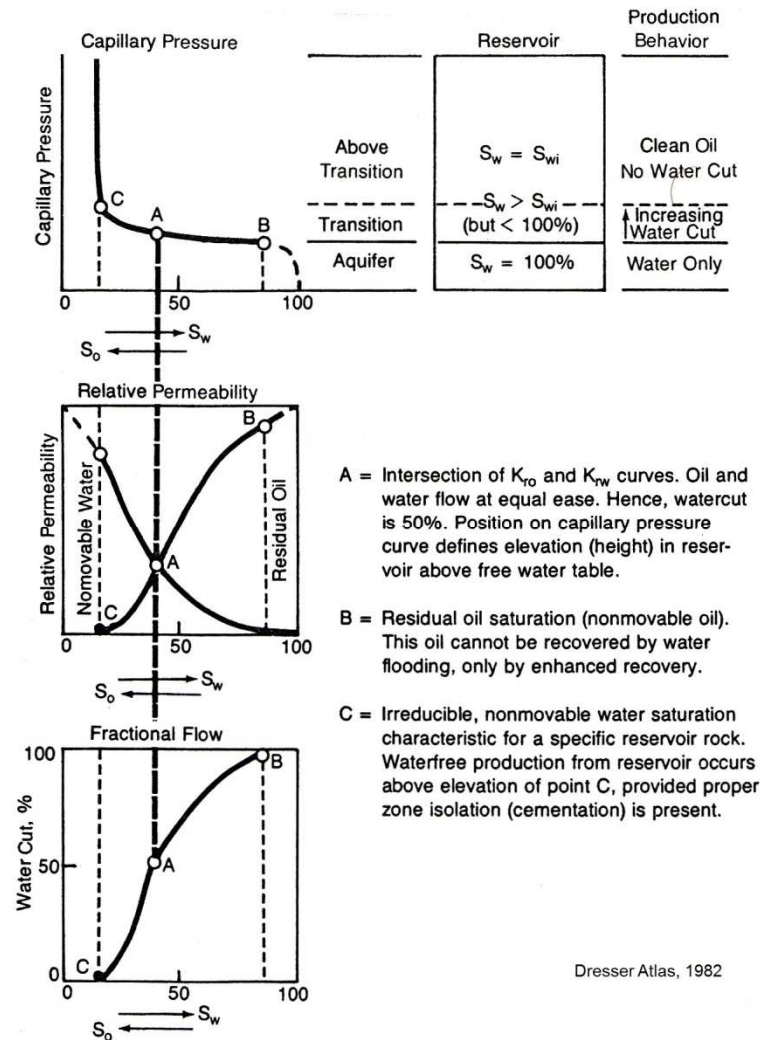
Základy Petrophysics



Interpretace petrofyzikálních dat

Určení efektivních ložiskových intervalů (net reservoir, net pay intervals), stanovení ložiskových kontaktů

- Stanovují se mezní hodnoty (cut-offs) pro vyčlenění efektivních intervalů - ložiskových (net reservoir) a produktivních (net pay).
- Ložiskový interval reprezentuje hornina, která v pórovém prostoru obsahuje pohyblivá fluida (free water, movable oil). Aplikují se VSH a PHIE cut-offs.
- Produktivní interval je ložiskovým intervalem v zóně uhlovodíků, tedy nad kontaktem. Aplikují se VSH, PHIE a SW cut-offs.
- Součástí vyčlenění efektivních intervalů je stanovení kontaktů OWC, GWC, GOC – původních (OOWC) případně druhotných (SOWC).
- Výstupem uplatněných cut-offs jsou průměrné hodnoty kolektorských parametrů (zone averages) pro dané zóny (gas, oil, water) a vyčleněné horizonty/vrstvy ložiska.



Základy Petrophysics



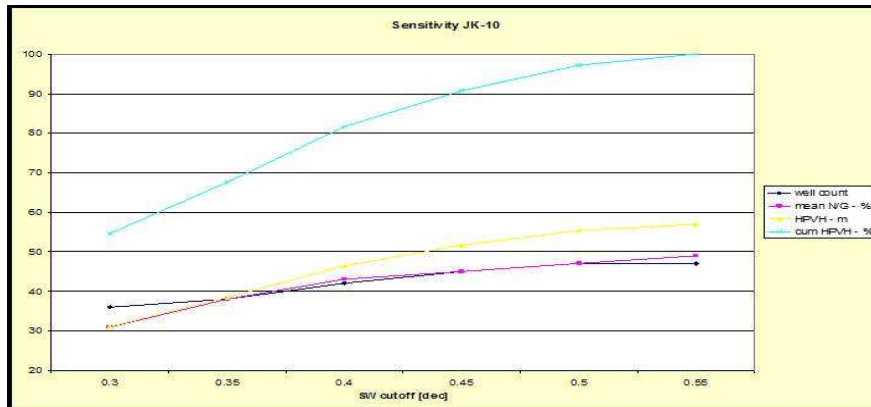
Interpretace petrofyzikálních dat

Určení efektivních ložiskových intervalů (net reservoir, net pay intervals)

SUMMARY REPORT													
Net Thickness Cutoffs													
Description	Curve	Cutoff											
Porosity	PHIE	0.12											
Water Saturation	SW	0.50											
Clay Volume	VCL	0.50											
Depth in ft unit.													

Well Name	Zone Name	Top Depth (MD)	Bot Depth (MD)	Top Depth (TVDSS)	Bot Depth (TVDSS)	Gross Interval	Net Interval						
							Net Int (TVDSS)	Res/Gross Ratio	PHI [dec]	Sw [dec]	KH [mD]	PHIH [m]	HPVH [m]
A	SAND A	9610	9704	9531.875	9625.636	93.865	93.865	1	0.206	0.473	0.473	19.326	10.188
A	SAND B	9731	10012	9652.567	9932.856	280.393	275.177	0.981	0.196	0.427	0.427	54.015	30.954
A	SAND C	10063	10072	9983.726	9992.702	9.08	9.08	1	0.204	0.495	0.495	1.855	0.937
A	SAND D	9610	10072	9531.875	9992.702	460.931	446.301	0.968	0.2	0.457	0.457	89.434	48.551
B	SAND A	10007	10119	9918.188	10029.91	111.822	109.424	0.979	0.214	0.688	0.688	23.366	7.298
B	SAND B	10141	10299	10051.85	10209.48	157.731	137.763	0.873	0.2	0.73	0.73	27.542	7.434
B	SAND C	10316	10339	10226.44	10249.38	23.04	23.04	1	0.2	0.757	0.757	4.601	1.118
B	SAND D	10007	10339	9918.188	10249.38	331.292	308.43	0.931	0.205	0.71	0.71	63.269	18.347
C	SAND A	9842	9954	9430.067	9541.868	111.901	109.206	0.976	0.208	0.442	0.442	22.666	12.645
C	SAND B	9975	10221	9562.829	9808.356	245.627	226.664	0.923	0.209	0.524	0.524	47.307	22.499
C	SAND C	10258	10295	9845.28	9882.207	37.027	35.33	0.954	0.234	0.73	0.73	8.278	2.237
C	SAND D	9842	10295	9430.067	9882.207	452.24	416.71	0.921	0.212	0.538	0.538	88.334	40.813

Zone averages (zone-aves)



Sensitivity summary

SW cutoff	well count	mean N/G - %	HPVH - m	cum HPVH - %
0.3	36	31	31.1	54.7
0.35	38	38	38.5	67.7
0.4	42	43	46.5	81.7
0.45	45	45	51.6	90.7
0.5	47	47	55.3	97.2
0.55	47	49	56.9	100

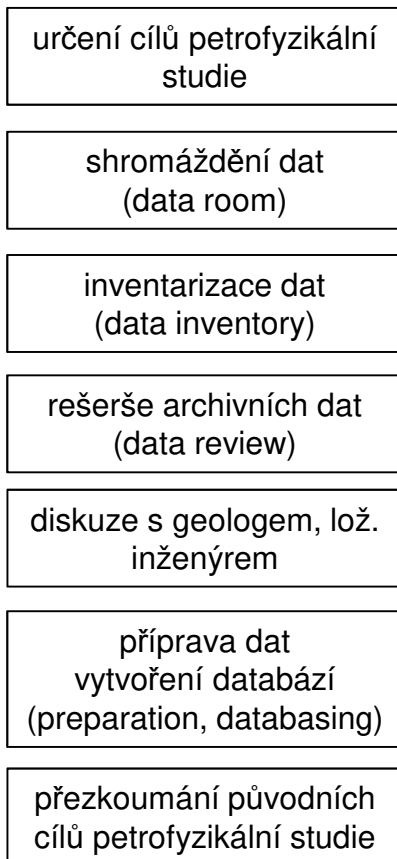
Základy Petrophysics



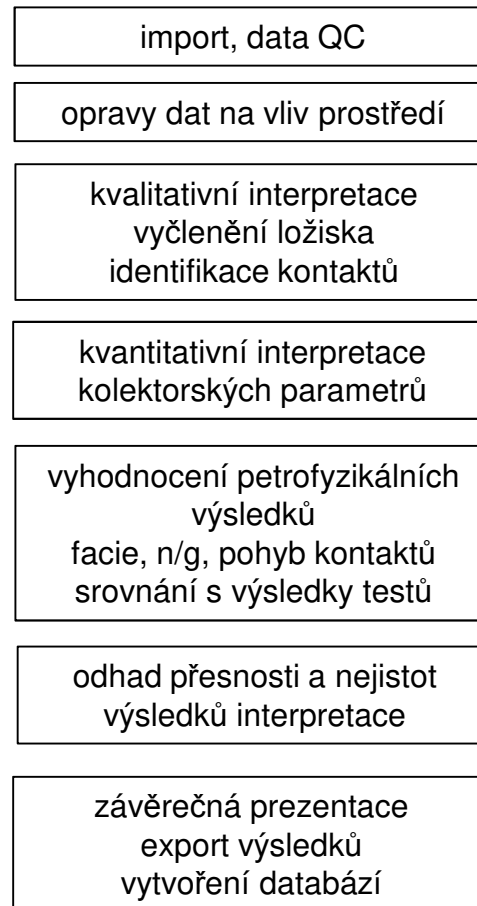
Interpretace petrofyzikálních dat

Typické work-flow petrofyzikální ložiskové studie

přípravná fáze



interpretace



standardní výstupy petrofyzikálních výsledků

- LAS a excel soubory petrofyzikálních dat, vstupů do procesu interpretace (edited, Qced, corrected data)
- LAS soubory křivek výsledků interpretace (VSH, PHIT, PHIE, SW, SXO, BVW, KH, RESFLAG, PAYFLAG...)
- excel soubory výsledků interpretace (zone averages, analýzy měření na jádrech, tabulky)
- závěrečná zpráva
- karotážní diagramy interpretovaných vrtů (CPI logplots)



Literatura

- Dresser Atlas – Well Logging and Interpretation Techniques, 1982
- I. Juhasz – Conversion of routine air-permeability data into stressed brine-permeability data, in: 10th European Formation Evaluation Symposium, Aberdeen; April, 1986, p. 22-25
- S. Mareš a kol. – Úvod do užité geofyziky, SNTL, 1990.
- David Allen at al – Trends in NMR logging, Schlumberger paper, 2000.
- O. Torsæter, M. Abtahi - Experimental Reservoir Engineering Laboratory Work Book, Norwegian University of Science and Technology, 2000
- Schlumberger – Log Interpretation Charts, 2000.
- Trevor Williams – Well Logging Principles and Applications: Borehole Image Analysis. Borehole Research Group, LDEO, April 11, 2008.
- Schlumberger – Multifunction LWD Service, EcoScope brochure, 2008.
- Schlumberger – Real-time LWD sonic for advanced drilling optimization and formation evaluation, sonicVISION brochure, 2010.
- Schlumberger – Wireline Services Catalog, 2015.
- Schlumberger – Invizion Evaluation and Isolation Scanner Services Help Operator Isolate Shallow Aquifer, Case study, 2015.