

Pánevní analýza (základní pojmy)

1. Klasifikace pánví a depoziční prostředí (úvod)

Sedimentární pánve - oblasti, kde dochází k akumulaci sedimentu ve značné mocnosti a jeho zachování po geologické jednotky času.

K těmto oblastem přiléhají oblasti s erozí (dlouhodobou) a oblasti, kde jsou erozní a depoziční procesy v rovnováze.

Nejrůznější tvary a rozměry sedimentárních pánví (obvykle v des. - stovkách km).
Obvykle deprese

Aktivní depoziční pánve
Neaktivní ale nedeformované pánve
Silně deformované pánve

Zachování původního tvaru a kompletního sedimentárního záznamu

Tektonické klasifikace pánví (globální a regionální tektonika) - desková tektonika

Vlastnosti sedimentární výplně pánví jsou ovlivněny dalšími faktory

Sedimentární procesy a facie jsou řízeny paleogeografií (morfologie, klima, horniny a tektonická aktivita ve zdrojové oblasti), depozičním prostředím, vývojem horninotvorných organismů, atd.

Klasifikace pánví dle kritérií rozpoznatelných přímo v terénu (litofacie, faciální sledy a asociace, depoziční prostředí, geometrie sedimentárních těles).

1.1. Tektonická klasifikace pánví

Desková tektonika

Řada klasifikací pánví

-typ podložní kůry, typ pohybu desek.

Základní prototypy pánví.

*Vnitrodeskové poklesové/prohybové pánve
(sag basins)*

Kontinentální kůra, divergentní pohyb desek, extenze, termální efekt, pomalá subsidence. V případě velkých pánví mohou chybět zlomové systémy na okraji pánve či centrální riftová zóna



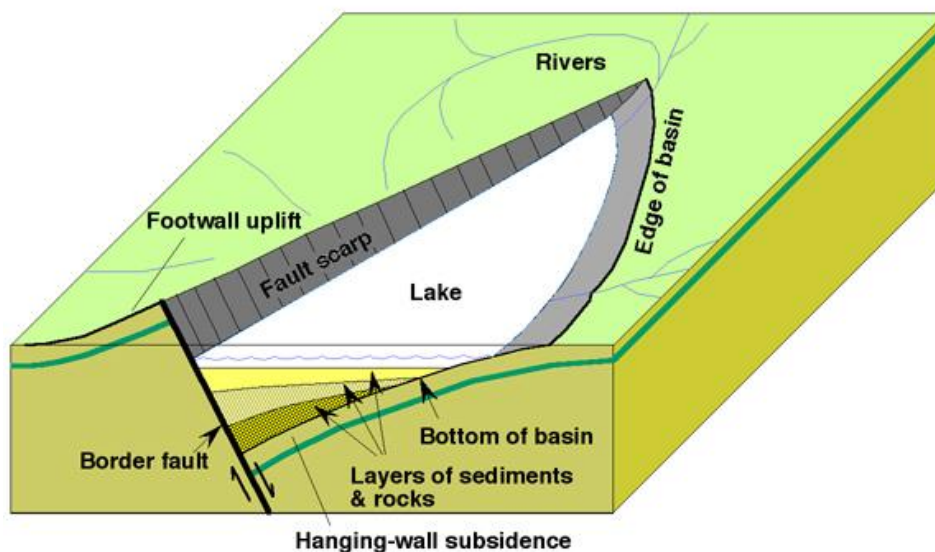
Obrázek 1: Sag basin (Mann, 2006)

Subsidence díky ztenčování kůry, rozdílech v měrné hmotnosti, další dlouhodobá subsidence díky termálním vlivům, depozici.

Cold spot

Vnitrozemské příkopy a rifty

Úzké protáhlé pánve, zlomové omezení, symetrický či asymetrický průřez (halfgraben).



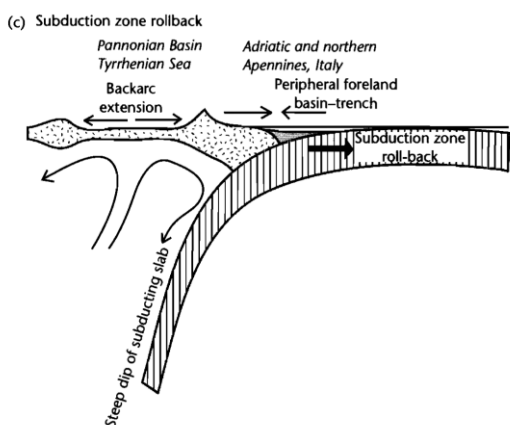
Obrázek 2: Halfgraben (upraveno podle Allen, 2006)

Zakrnělé rifty a aulakogeny

Přechodná kůra

Pánve na pasivním okraji

Centrální části pánve v hloubkách kolem 2-3 km. Asymetrický depoziční systém - klínovitá tělesa sedimentů.



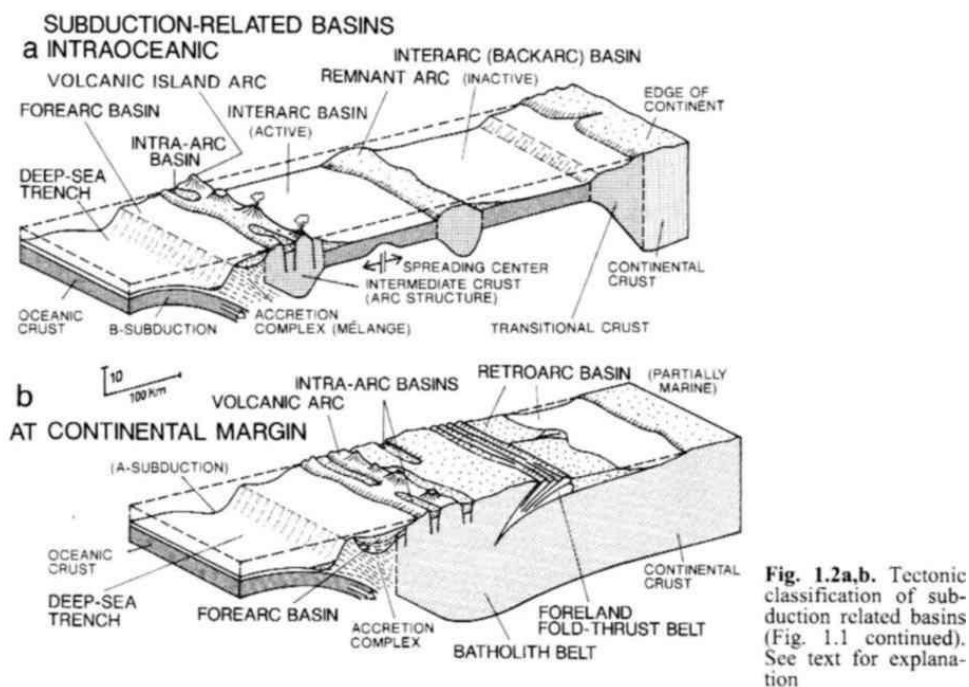
Obrázek 3: Subdukce (Einselle, 2000)

Oceánské poklesové (sag) pánve nebo rodící se oceánské pánve

Oblast mezi středooceánským hřbetem a vnějším okrajem přechodného typu kůry

Pánve vázané na subdukci

Konvergentní okraje a orogenní deformace
Patří sem hlubokomořské příkopy, předobloukové, zaobloukové a vnitroobloukové pánve



Obrázek 4: Pánve na konvergentním rozhraní, předoblouková pánve, zaoblouková pánve (Einselle, 2000)

Pánve spojené s terány

Pozice mezi mikrokontinenty, které mají alespoň částečně kontinentální kůru. Samotné pánve jsou obvykle situovány na oceánské kůře.

Transformní (strike-slip) pánve a příkopy (wrench)

Transtenzní a transpresní složka

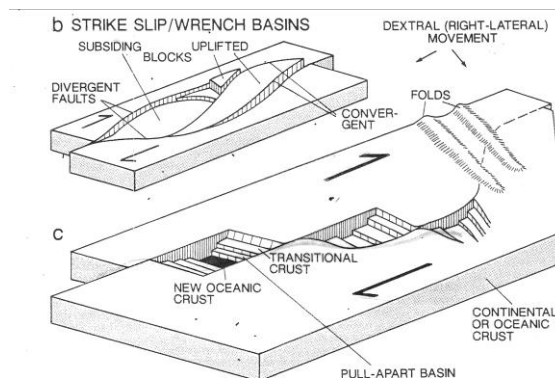


Fig. 1.3a-c. Tectonic basin classification (Fig. 1.2 continued). Collision-related basins and strike-slip/wrench basins. See text for explanation

Pánve vázané na kolizi

Patří sem zbytkové pánve (zbytky oceánských pánví), předpolní a periferní pánve, týlové (retroarc) a vnitrohorské pánve, pánve panonského typu.

Obrázek 5: Kolizní pánve nahoře, dole příklad strike-slip pánve (Einselle, 2000)

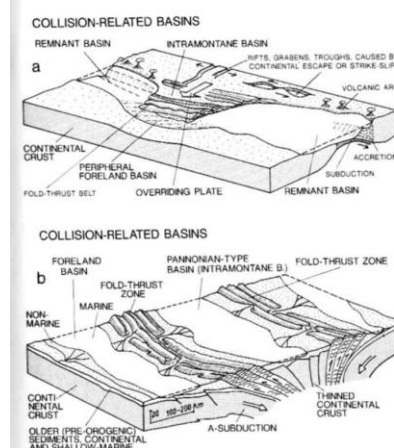


Fig. 1.3a,b. Tectonic classification of collision-related basins (Fig. 1.2 continued). See text for explanation

Vývoj skutečné pánve se v mnoha ohledech liší od modelu. Během vývoje může docházet ke změnám typu pánve (polyhistory basin) a tak ke komplexní tektonické a depoiční historii pánve.

1.2. Tektonika a vyplňování pánve

Tektonické pohyby ovlivňující pánev jako celek se odráží i v charakteru pánevní výplně. Tři koncové členy:

Pre-depoziční pánve

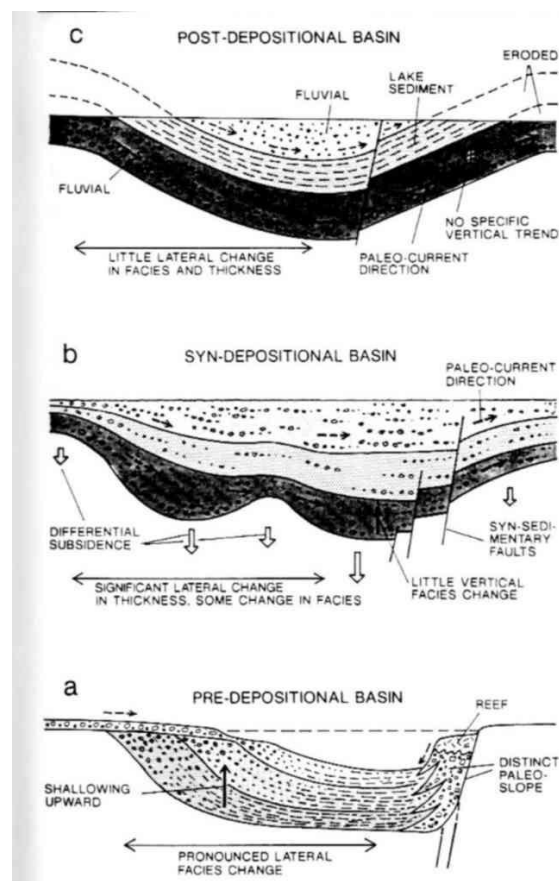
Tektonika předchází sedimentaci. Pokles hloubky depozičního prostředí v čase, postupné vyplňování pánve. Sedimentární transport, laterální i vertikální faciální asociace jsou dominantně ovlivněny morfologií pánve.

Syn-depoziční pánve

Sedimentace je ovlivňována tektonikou - rozdílná subsidence. Změny orientace transportu, změny mocností. Role morfologie pánve v závislosti na vztahu sedimentační rychlosti a rychlosti subsidence.

Post-depoziční pánve

Velmi malý vztah mezi transportem, distribucí a faciemi a následně vyvinutou pánevní strukturou.



Obrázek 6: Vyplňování sedimentární pánve (Einselle, 2000)

Nejrůznější přechody mezi těmito koncovými členy. Komplexní historie pánve.

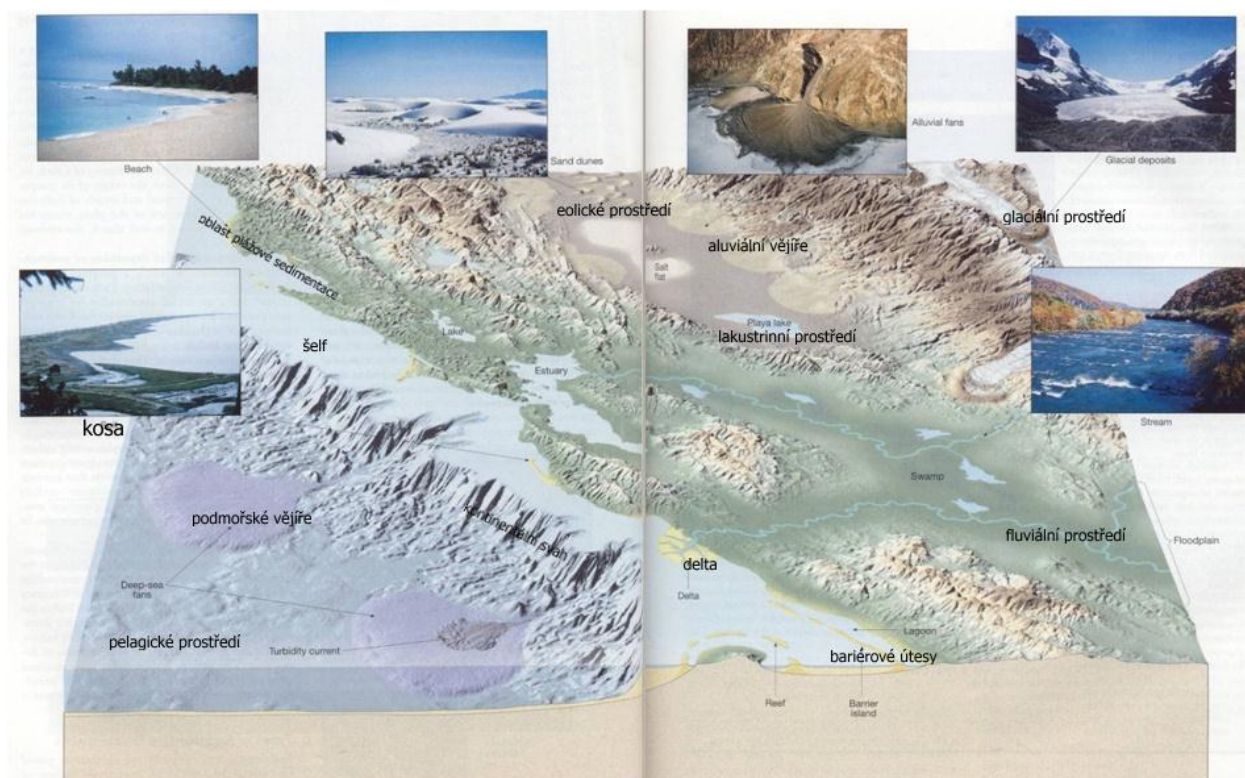
1.3. Morfologie pánve a depoziční prostředí

Tvar pánve je v obecné míře řízen tektonickými procesy.

Morfologie pánve určená sedimentárním povrchem je výsledkem vzájemného vztahu mezi tektonikou a sedimentací.

Jen velmi volný vztah mezi tektonickými procesy a depozičními prostředími. Jednotlivá depoziční prostředí se vyvíjí v nejrůznějších tektonických režimech (tvar celé pánve, vertikální a laterální změny facií, provenience...).

Erozní báze („erosional base level“), redistribuce materiálu v rámci pánve (např. mělkomořské vs. hlubokomořské depoziční prostředí).



Metody studia moderních a fosilních sedimentů

Depoziční prostředí

Několik tisíc depozičních pánví - limitované množství depozičních prostředí

Klasifikace pánví dle depozičních prostředí (predepoziční morfologie, klima).

Vyplňování pánví

- Fluviální prostředí - erozní báze, přínos sedimentů, spádová křivka (gradient vs. směr transportu)
- Glaciální a eolické prostředí - ledovcová eroze, deflace (tvorba depresí), akumulace sedimentů (tvorba elevací). Migrace materiálu.
- Lakustrinní prostředí - zdrojová oblast vs. klima vs. subsidence
- Delt - přechodné prostředí. „nadvodní část“ - fluviální a jezerní procesy, „podvodní“ část hydrodynamické a chemické procesy moře.
- Okrajová a epikontinetální moře - výměna vody s oceánem
- Mělká moře a kontinentální šelf- redistribuce materiálu
- Hlubokomořské pánve - šelf, kontinentální svah, kontinentální úpatí (continental slope, continental rise) - Atlantický typ okraje kontinentu.
- Podmořský systém hrástí a příkopů
- Submarinní hřbety, platformy a podmořské hory - slabý sedimentární záznam, velmi kontrastní k okolí (biogenní, biochemické nebo chemické sedimenty).

Akumulace sedimentů a sedimentární facie - obecné trendy

Vliv terigenního přínosu sedimentů a rychlost depozice klesá v řadě: kontinentální pánve se značným reliéfem-ploché oblasti-mělká moře- hluboká moře

Pánve s nízkou depoziční rychlostí mají tendenci akumulovat sedimenty relativně bohaté organickou komponentou. Mají obvykle dlouhou dobu trvání a proto často ovlivněné synsedimentární tektonikou.

Rozsáhlé chemogenní sedimenty (evapority) - obvykle jezera nebo okraje mělkých moří. Pouze velmi rychlé a nepravidelné tektonické pohyby a v určitých typech pánví dochází k přímému vlivu tektoniky na sedimentární facie. Za tímto účelem spíše geometrie pánevní výplně, sedimentační rychlost atd.

| |
|---------------------|
| 1.4. Shrnutí |
|---------------------|

- Sedimentární pánve lze klasifikovat dle deskové tektoniky. Faktory ovlivňující vznik pánve také ovlivňují tvar pánve i geometrii pánevní výplně. Endogenní procesy
- Depoziční prostředí a sedimentární facie v rámci pánevní výplně jsou z velké míry řízeny jinými procesy (přínos sedimentu, „autochtonní“ produkce sedimentu, distribuce a redistribuce sedimentů, hydrologický režim....). Exogenní procesy.
- Obdobné sedimenty a sedimentární facie se mohou vyskytovat v různých typech pánví - doplňující klasifikace pánví s ohledem na depoziční prostředí.
- K pochopení vývoje pánve (důvodu vzniku pánve, jednotlivá depoziční prostředí a jejich vývoj) je nutné studovat pánve různými metodami (rozdílná škála metod).

Depoziční prostředí a faciální modely (přednáška Základy sedimentologie)

Kontinentální sedimenty

Glacigenní sedimenty

Fluviální sedimenty, aluviální kužely a kuželové delty (fan delty)

Eolické sedimenty

Vulkanoklastické sedimenty

Jezerní sedimenty

Pobřežní a mělkomořské sedimenty (siliciklastické i karbonátové)

Pobřežní sedimenty

Mělkomořské sedimenty (siliciklastické)

Karbonátové plošiny a reef-laguna komplexy

Marinní delty

Estuária

2. Sedimenty riftových pánví

Velká variabilita

Malé riftové struktury- sukcese: fluviální sedimenty-jezerní (playa) sedimenty-fluviální sedimenty

Kontinentální okraje – vývoj k hlubokomořským marinním sedimentům (sledy prohlubování a změlčování)- střídání deltových, šelfových sedimentů a sedimentů kontinentálního svahu (střídání fází riftingu).

Proměnlivá rychlost subsidence - změny tvorby depozičního prostoru- střídání progradace a retrogradace

Velké kontinentální rifty – komplexní vývoj, role topografie pro vývoj pánve a její hydrogeologický a sedimentologický charakter.

Zjednodušené faciální modely

Asymetrické rifty

Half-grabeny – značně asymetrická pánevní výplň (přínos sedimentu, depozice na opačných stranách pánve, přínos z okrajů pánve)

Osní vs. boční přínos, změny pozice vodního toku.

Role klimatu

Rychlost subsidence – marinní prostředí, karbonáty, evapority.

Výzdvih a sklon okrajů pánve může zabránit přínosu

Migrace zlomové aktivity (role hrástí a příkopů)

Příklady mladých riftových pánví

Východoafrický rift

Délka 4000 km

Velká variabilita riftových pánví a jejich výplně

Západní rift: (jezera, rozdíly okrajů a dna 3 km), vulkanická aktivita chybí

Východní rift: (nižší reliéf, příčné hřbety, řada drobných pánví, role pre-riftové topografie), významný vulkanismus, jezerní, fluviální a aluviální sedimenty



Obrázek 7: Východo africký rift, upraveno Goldbach 2012

Rudé moře a Suez

Pokročilá fáze vývoje Východoafrického riftového systému

70 MA – 4 fáze vývoje:

1. Pre-rift (křída-eocén)
2. Tvorba riftu (oligocén)
3. Subsidence (Miocén) _ pokles centra 6-7 km, výzdvih okrajů 2-3 km.
4. Rozšiřování oceánského dna (pliocén-recent)

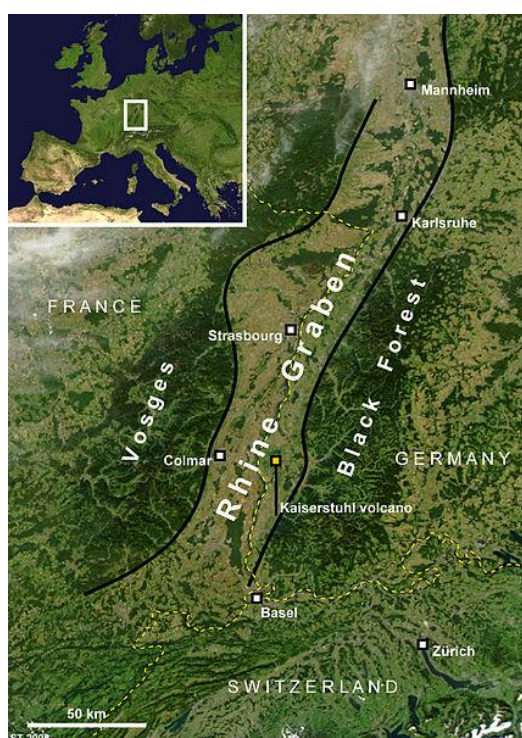
Rio Grande rift

Velký, vnitřně rozdělený riftový systém

Délka asi 1100 km (Colorado-Texas).

Vývoj od oligocénu, významný vulkanismus

Rýnský příkop

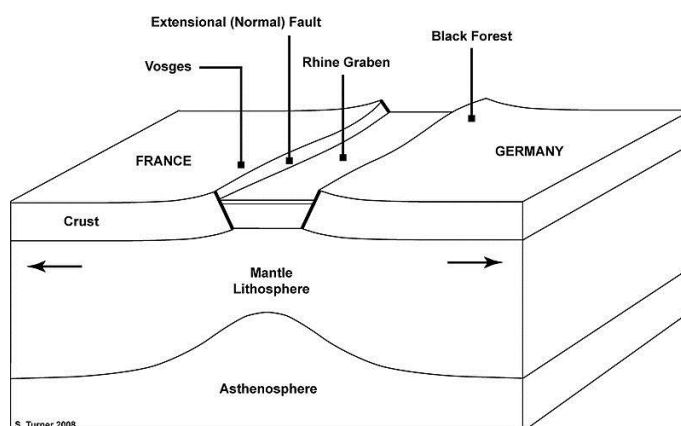


Levostraný horizontální posun, komplexní vývoj vázaný na Alpský orogén

Migrace zóny maximální subsidence z jihu k severu

Počátek riftingu v eocénu

Jezerní sedimenty (role klimatu), marinní ingrese, fluviální sedimenty, vulkanická aktivita.



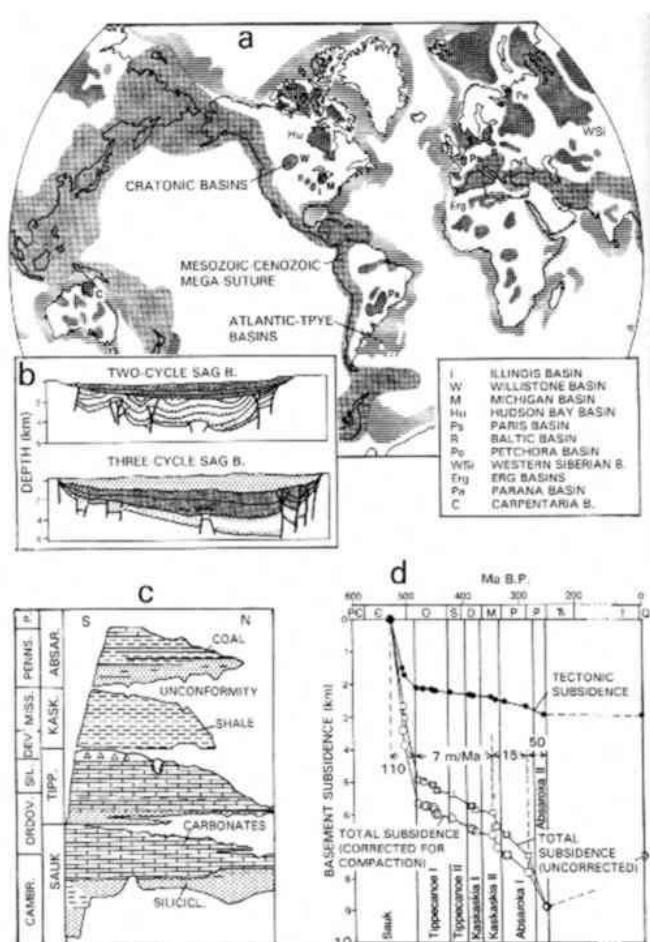
(Rýnský příkop, upraveno Goldbach 2012 dle Hagen 2008)

„Starší“ riftové pánve

Rozpad kontinentu Pangea v triasu a spodní juře

Zakomponování do struktur pasivního okraje (Atlantický a Indický oceán)

Vnitrodeskové poklesové pánve („sag basins“)



Obrázek 8: Sag basin (Einselle, 2000)

Vznikají z velkých depresí korového dosahu, které vykazují malou roli extenze. Typická je pomalá nelineární extenze trvající dlouhé časové období (200-600 M.a.). Subsidence je vyvolána především termální kontrakcí, eklogitizací spodní části kůry a/nebo vnitrodeskovým stresem.

- Časté jsou dvě nebo více fází tektonické a sedimentární evoluce (iniciální „riftový“ cyklus, po kterém následuje jeden či dva poklesové/„sag“ cykly).
- Depoziční prostředí jsou kontinentální, lakustrinní nebo mělkomořský. Časté jsou výrazné klimatické změny, sedimentace karbonátů, evaporitů, uhelné sedimenty, tillity, atd.



Obrázek 9: genetické typy jednotlivých sedimentárních pánví Evropy (data AAPG datapages, úprava v GIS, Goldbach, 2012)

3. Pasivní kontinentální okraje („Continental Rises and Terraces“)

Stadium „driftu“ (post-rift) - styk kontinent-oceán

Ochlazování litosféry – proces termální subsidence, nakloněné bloky a kry- proces zatížení („loading“)

Tři typy pasivního kontinentálního okraje

Nevulkanický pasivní okraj – zlomově omezená mozaika bloků (segmentace stovky km), malá role vulkanické aktivity, nejčastější případ

Vulkanické pasivní okraje

Riftové-transformní okraje-

Velmi rozdílná šířka, častá vnitřní segmentace

Tvorba bathymetrického/sigmoidálního profilu (příbřeží, šelf, kontinentální svah, dno pánve)

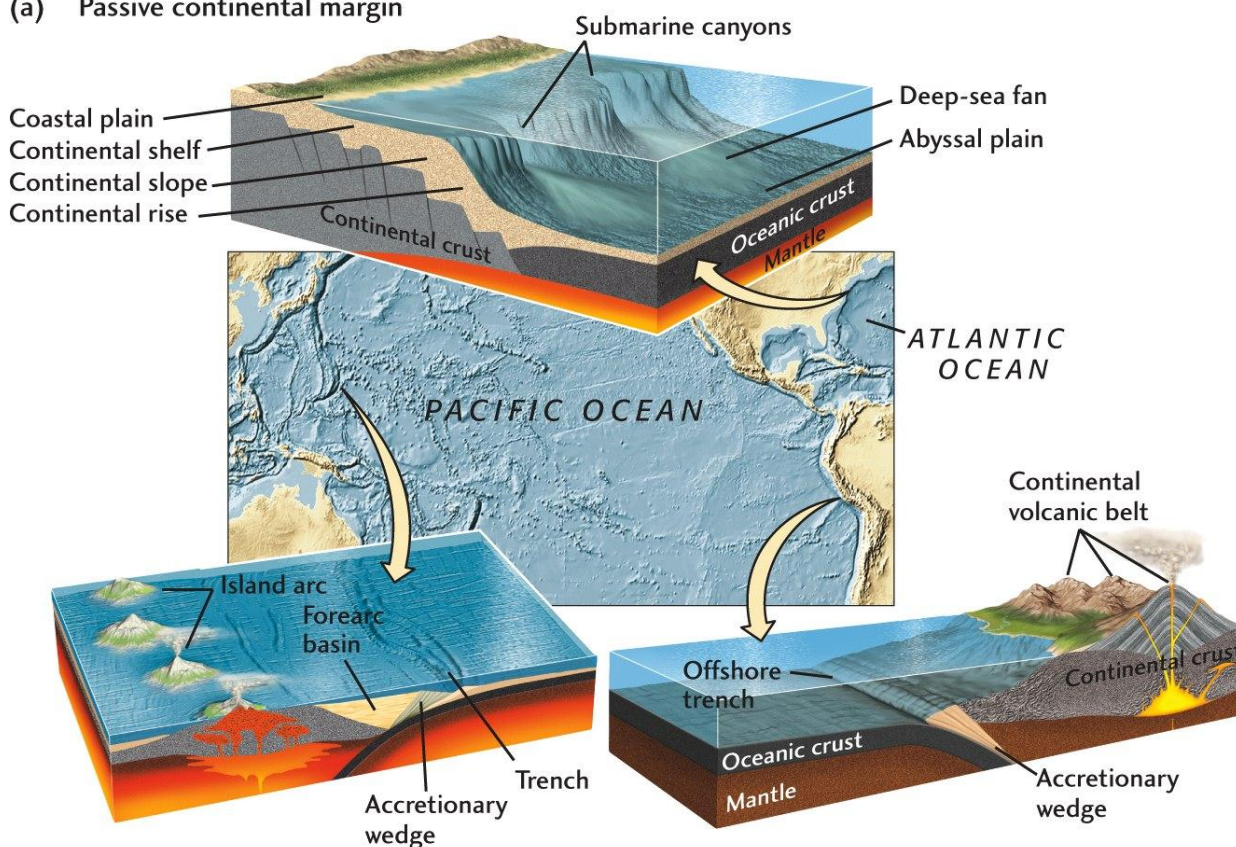
Překrytí starší výplně riftových pánví

Atlantický typ „zralého“ kontinentálního okraje

Sedimentační procesy: výčasy, vlnění, oceánské a gravitační proudy. Role klimatických změn.

Změny relativní hladiny (sekvenční stratigrafie) – progradační a retrogradační cykly

(a) Passive continental margin



(b) Active margin of the Marianas type

(c) Active margin of the Andean type

Obrázek 10: z http://hays.outcrop.org/GSCI100_08F_TT/lecture13.html

Typy sedimentace v rámci kontinentálního okraje

Siliciklastická sedimentace

Přínos klastických sedimentů z pevniny, podélný transport oceánskými proudy

Tvorba klínovitého tělesa sedimentů, flexurní prohnutí, migrace okraje subsidence do kontinentu

Deltová sedimentace:

Výrazná role morfologie okraje („vazba s aktivním riftingem“) – pozice velkých toků (Amazonka, Niger, Mississippi) a tektonické linie (New Madrid line, Benue, Amazonas a Solimos)

Delty: přínos množství materiálu- pohyb sedimentu za hranici kontinentální/oceánská kůra

Role diapirismu evaporitů (evapority – synriftové stadium)- Severní moře, Mexický záliv

Karbonátová sedimentace

Mělkomořské karbonáty, karbonátové reefy na okraji šelfu (svahové procesy, gravitační proudy)

Kombinace těchto siliciklastické a karbonátové sedimentace

Shodné rysy depozičního vývoje protilehlých pasivních okrajů oceánu během syn-riftového stadia, značné rozdíly během post-riftového stadia.

Vyplnění až po úroveň hladiny

Vyzdvižení částí pánví na pasivním okraji- pobřežní pánve.

Uzavření oceánu, subdukce a kolize je zakomponování sedimentů pasivního okraje do akrečních klínů či orogennů (deformace, metamorfóza).

Příklad

západní pobřeží Severní Ameriky

„Podvyživené“ okrajové pánve, podmořská plošiny/roviny a oceánské pánve

Transport „přebytečného“ sedimentu přes okraj šelfu do hlubších částí pánve v pokročilém stadiu vývoje pánve při relativně pomalé subsidenci.

Rychlá subsidence – „podvyživené pánve“

Podmořská plošiny (1-3 km hloubky) – izolace od terigenního přínosu

Pokles oceánské kůry (2,5 km středoocéánský hřbet vs. 4,0-5,0 km oceánské pánve)

Jemnozrné hlubkomořské sedimenty (role CCD)

Zachování pouze v rámci ofiolitů (Newfoundland, Kypr, Omán)

Kontinentální svahy

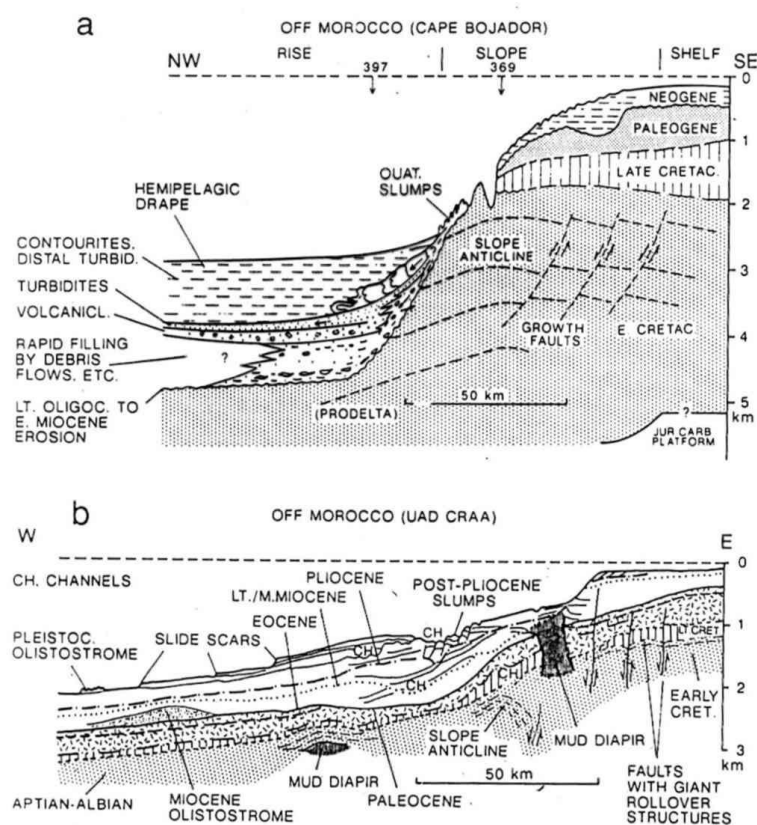


Fig. 12.16a,b. Schematic cross sections of continental slope off (a) Cape Bojador and (b) Uad Craa, Morocco. Note multi-phase erosion and mass wasting on huge scale. (After von Rad and Wissmann 1982)

Obrázek 11: Kontinentální svahy (Einselle, 2000)

Pánve na konvergentním rozhraní

Zánik či zkracování litosféry

Aktivní ostrovní oblouk vs. aktivní okraj kontinentu

Charakter podložní kůry – rozdílná subsidence, mocnosti sedimentů

Rozdíly v charakteru konvergence (relativní pohyb desek, charakter desek, směr a rychlost subdukce, rozdílná morfologie okrajů desek)

Role extenze (zachování vulkanických a sedimentárních sledů)

Kompresní systém oblouk-příkop

Vysoká rychlost konvergence, protisměrně nebo velmi šikmá orientace, malý sklon zóny subdukce.

Kompresie v nadložní desce, silná zemětřesná aktivita v široké zóně, příkrovová tektonika stovky-tisíce km za obloukem

Relativně mělké příkopy, rozsáhlý vápenato-alkalický magmatismus, výrazný reliéf

„Retro-arc foreland basins“ (východní Andy)

Rychlost a charakter sedimentu závisí na klimatu a charakteru říční sítě

Extenzní systém oblouk-příkop

Nízká rychlost konvergence, protisměrná či šikmá kolize, „slabá“ zemětřesná aktivita v relativně úzké zóně, značný sklon zóny subdukce

Recent - kontinentální svahy se siliciklastickou sedimentací (velká šířka 50-150 km, sklon několik stupňů)

Karbonátová sedimentace – větší sklon, široká depoziční oblast

Depozice – suspenze, gravitační proudy

Eroze či nedepozice – oceánské/konturové proudy (role nízké hladiny)

Konstruktivní a destruktivní fáze vývoje depozice na kontinentálním svahu

Významné role morfoologických elevací (tektonika, vulkanismus, diapirismus, karbonátové nárůsty)

Korová extenze – stovky až tisíce km od příkopu (vnitroobloukové a zaobloukové pánve).
 Blokovaná morfologie pánví (zlomy, orientace ker).
 oceánské okraje Pacifiku
 Hluboké příkopy, rozsáhlý vápenato-alkalický a bazaltický vulkanismus

Kombinace kompresních, extenzních rysů a horizontálních posunů na destruktivních okrajích.

Hlubokomořské příkopy a akreční klíny

Chladnutí oceánské kůry, pokles do hloubek, hlubokomořské sedimenty, zachování tektonických struktur

Flexurní ohýbání v zóně subdukce, periferní pahorek (cca 150 km vzdálenost od příkopu, relativní výška cca 500m) - reaktivace zlomů vzniklých v rámci riftingu - vznik reliéfu bloků - řada lokálních pánví (turbidity).

Akreční komplex/prisma

Hloubky a tvar příkopu- role rychlosti subdukce, reliéfu subdukující desky, rychlosti a charakteru přínosu sedimentů do pánve (detritické vs. hlubokomořské sedimenty)- míra vyplnění příkopu.

Laterální přínos sedimentu vs. osní transport, blízké vs. vzdálené zdroje

Proximální vs. distální oblasti, rozdílná intenzita přínosu materiálu při okraji kontinentu a v rámci oceánu.

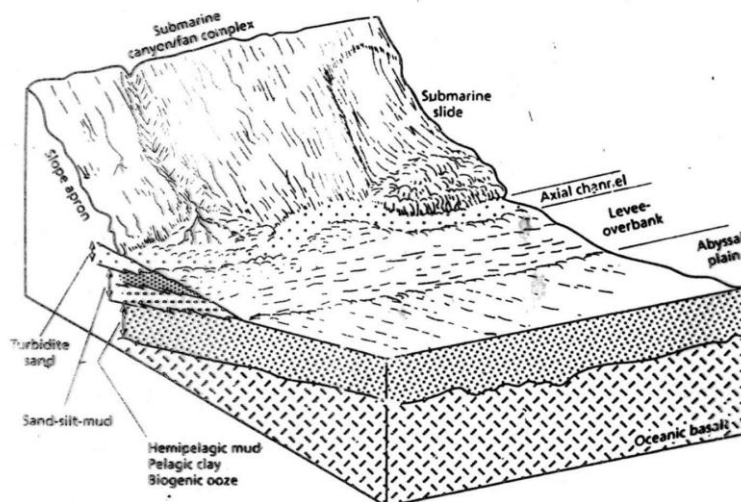


Fig. 28.12 Simplest possible relationships for lateral submarine fan input to a subduction margin; a coarsening-upwards sequence is produced. (from Piper et al., 1973.) In practice, inner slope basins, axial deflections and runout/reversal behaviour complicate the picture (see Chapter 26).

Aktivní násuny („décollement“) - potenciál zachování sedimentů prismatu – rezistence vůči smykovému namáhání – vnitřní segmentace v rámci akrečního prismatu (vývoj v čase)- deformace sedimentů.

Chaotické struktury (gravitační -tektonické deformace, pohyb vody).

Sundský oblouk, Shimano belt-Shikoku, Chilský příkop
 Interpretace

Obrázek 12: (Einselle, 2000)

Předobloukové pánve („Fore-arc basins“)

Vznik mezi vulkanickým obloukem a hlubokomořským příkopem

Pozice na oceánské nebo přechodné kůře

Rozdíly v batymetrickém profilu předpolních pánví, vývoj obvykle z vnitřní strany akrečního klínu

Sundský oblouk - plochý tvar, široké (stovky km) ploché svahy

Krétský oblouk - komplexní mozaika pánví a elevací

Subsidenční historie velmi komplikovaná

Relativně hrubozrnná sedimentace (vulkanoklastika, fluviální a deltové sedimenty) - hlubokovodní sedimentace s turbidity s celkově CU trendem, rychlé vyplňování (flexurní subsidence)- migrace zóny maximální subsidence-široká plochá změlčující se pánev.

Zdroj především z vulkanického oblouku (spadová pyroklastika, submarinní gravitační proudy) - mocnosti sedimentů několik km.

Příklady:

Jihoamerické předpolní pánve (Ekvádor, Peru, Chile), Great Basin (Kalifornie), Sumatra-Jáva, Nové Hebridy, Mariany, Malé Antily

Vnitroobloukové pánve („Intra-arc basins“)

Migrace vulkanické aktivity

Extenzní aktivita v rámci vulkanického oblouku, růst a kolaps magmatických dóků, vznik kalder - tvorba depocenter - především vulkanoklastické sedimenty.

Vznik vnitroobloukových pánví z pánví předobloukových či zaobloukových (změna charakteru subdukce).

Zaobloukové pánve („Back-arc basins“)

Extenze v rámci destruktivního okraje vývoj na oceánském, kontinentálním či přechodném typu kůry

Možnosti vzniku:

A) Separace ostrovního nebo kontinentálního vulkanického oblouku do řady bloků (čedičový, CA vulkanismus)-tvorba nové oceánské kůry - „aktivní“ zaobloukové pánve (okraje Pacifiku, Středozemní a Tyrhenské moře).

A. Změna charakteru subdukce- posun subdukční zóny ve směru do oceánu-„pasvní“ zaobloukové pánve (Beringovo moře, Korálové moře).

Hlubokomořské a vulkanoklastické sedimenty,

Velmi proměnlivé sedimentární sledy, zdroj z obou okrajů

Omezená velikost - vyplnění a uzavření pánve

Asymetrický tvar – vulkanický oblouk (násuny) vs. blokově/zlomově omezený vnější okraj

Časná stadia aktivní zaobloukové pánve (hřbet Iwo Jima, Japonské a Filipínské moře, Mariany)

Soustava asymetrických příkopů („half-grabeny“) - separace řadou horizontálních posunů

Sedimentace především pyroklastické a gravitační proudy, spadová pyroklastika.

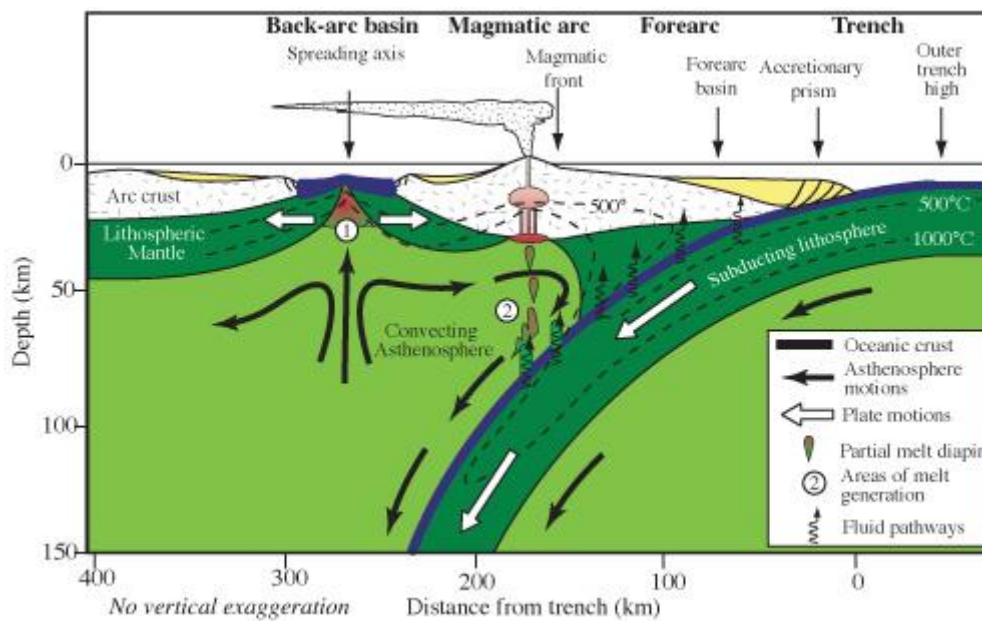
V pozdějších stadiích vývoje narůstá role hlubokomořské sedimentace.

Role termální subsidence

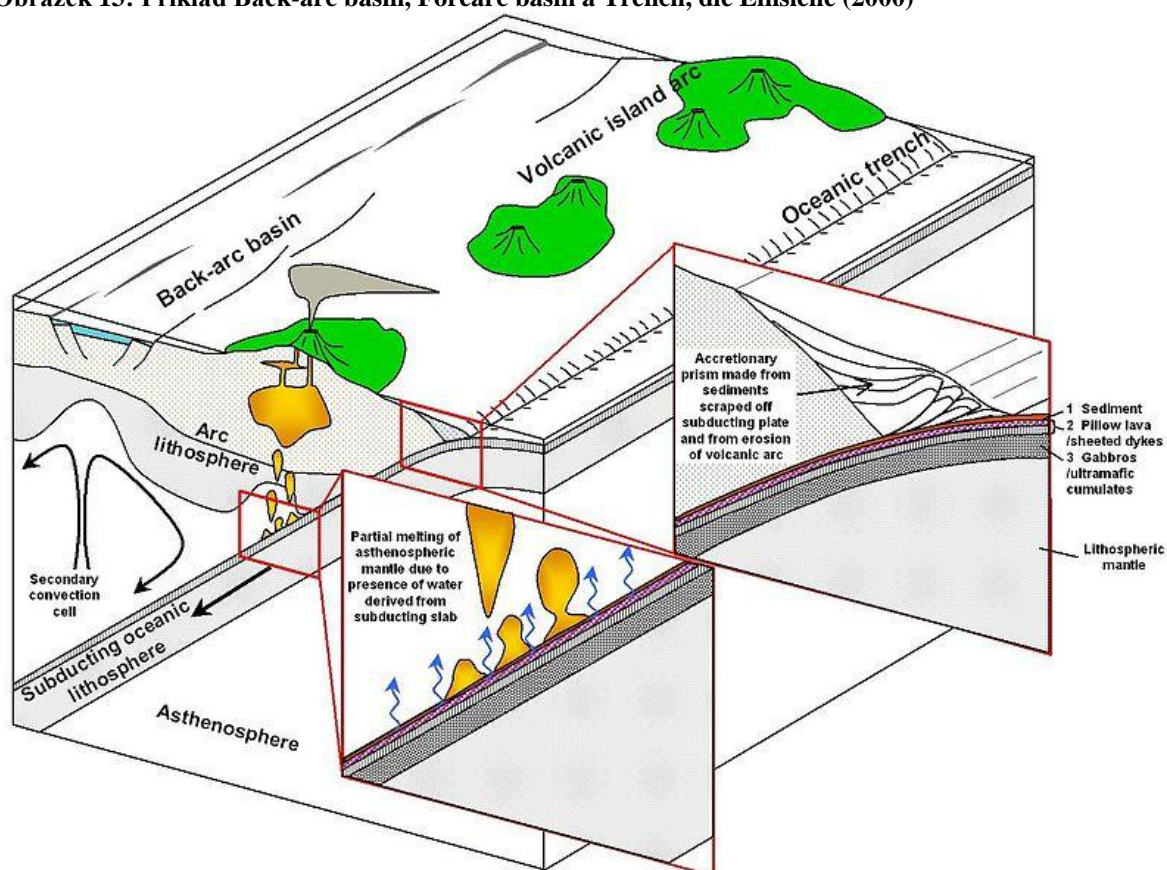
Několik stadií vývoje

Příklady:

Příkop Okinawa, Egejské moře (vynoření nad hladinu, terestrické sedimenty transportovány do hlubokovodních podmínek, gravitační proudy).



Obrázek 13: Příklad Back-arc basin, Forearc basin a Trench, dle Einselle (2000)



Obrázek 14: Subdukce, Back-arc basin (Einselle, 2000)

„Retroarc basins“

Vývoj za vulkanickým obloukem na kontinentální či přechodné kůře, procesy zkracování-komprese

Rozdílná rychlost pohybu k subdukční zóně

Magmatismus, zvyšování mocnosti kůry, systém násunů ve směru do kontinentu. Kompresní systém oblouk-příkop vede k vývoji do „retroarc foreland basins“ (násuny, zatížení desky, flexurní prohnutí).

Termín „foreland“ – období před deskovou tektonikou pro označení pánví mezi orogenní frontou a kratonem.

Iniciální hrubozrnná klastická depozice-mělkomořské sedimenty-sedimentace molasového typu (zdroj z vulkanického oblouku a vzdálenějšího kratonu)

Pánve na východním okraji And (200 km šířka, 8 km sedimentů, kontinentální sedimenty, role klimatu).

Viz. obrázek číslo 4

Identifikace pánví spojených s konvergentními okraji litosferických desek

Prostorová pozice ve vztahu k magmatickým obloukům a hranicím kontinentálních desek

Součást orogénů (deformace, metamorfóza)

Ofiolity

4. Pánve spojené s kontinentálními kolizemi

Předpolní pánve („Foreland basins“)

Velmi často studované pánve - geologická data týkající se vývoje orogenních pásem

Předpolní- relativně nedeformovaná kontinentální kůra

Násun orogenního klínu (flexurní prohnutí, zdroj sedimentu)

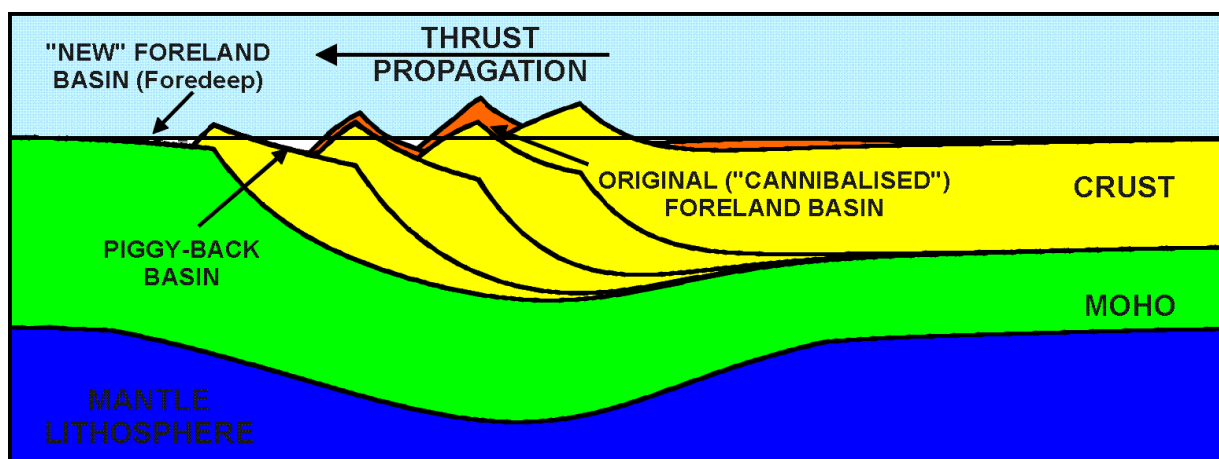
Kolizní (periferní) předpolní pánve - subdukovaná deska v rámci kolizní zóny (molasové pánve Alp, Himaláje, atd.)

Retro-arc předpolní pánev- nadložní deska při destruktivním okraji (Andy, Skalisté hory)

Velikost a rozsah předpolní pánve závisí na reologických podložní desky, rychlosti, směru a velikosti nasouvaného orogenního klínu, rychlosti transportu materiálu do pánve, vnitrodeskovém orientovaném tlaku, relativních změnách hladiny, klimatu, morfologii pasivního a aktivního okraje.

Vývoj základních depozičních oblastí v rámci předpolní pánve a jejich migrace v čase a prostoru.

Pánve nesené - Piggy-back basins



Obrázek 15: Piggy back basin (upraveno dle Einselle, 2000)

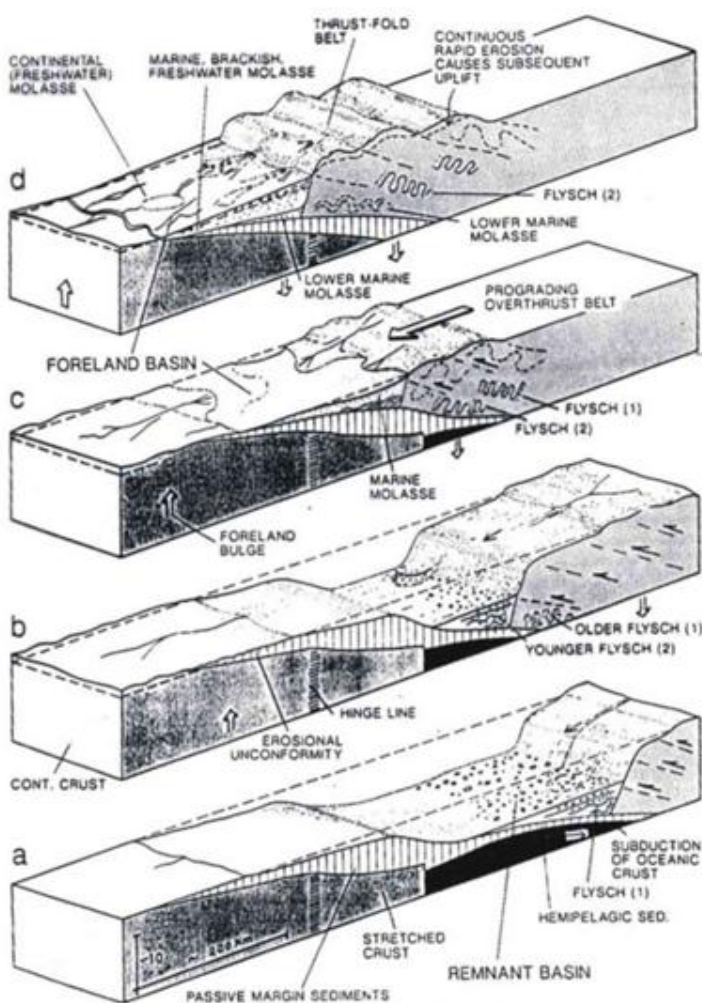
Termín „foredeep“

Přeplované a nedostatečně vyplňované pánve – fluviální vs. marinní sedimenty.

Nahoru hrubnoucí sekvence, celkový trend změlčování depozičního prostředí

Osní vs. boční přínos sedimentu

Reliktní oceánské pánve (Remnant ocean basins)



Obrázek 16: Reliktní oceánské pánve (Einselle, 2000)

Alespoň jeden konvergentní okraj oceánu, submarinní gravitační proudy - turbidity, akreční klín.

Termín flyš

Subdukce nepravidelného okraje - časově rozdílný orogenní výzdvih a eroze- depozice v reliktech oceánu (zuzující se pánve před kompletní kolizí).

Přínos sedimentu narůstá (pokračující kolize) a současně dochází ke zmenšování reliktních oceánských pánví.

Počátek vývoje jako hlubokooceánská pánev - velmi rychlá sedimentace a vývoj do periferní předpolní pánve (konec subdukce oceánské kůry a počátek deformace kontinentální kůry). Kolize v některých částech a transport materiálu z předpolních přeplovovaných pánví ve formě delt do reliktní oceánské pánve. Typický je podélný přínos sedimentu, role horizontálních posunů a šikmá kolize (deltová sedimentace – Indus, Ganga – Bengal a Indus

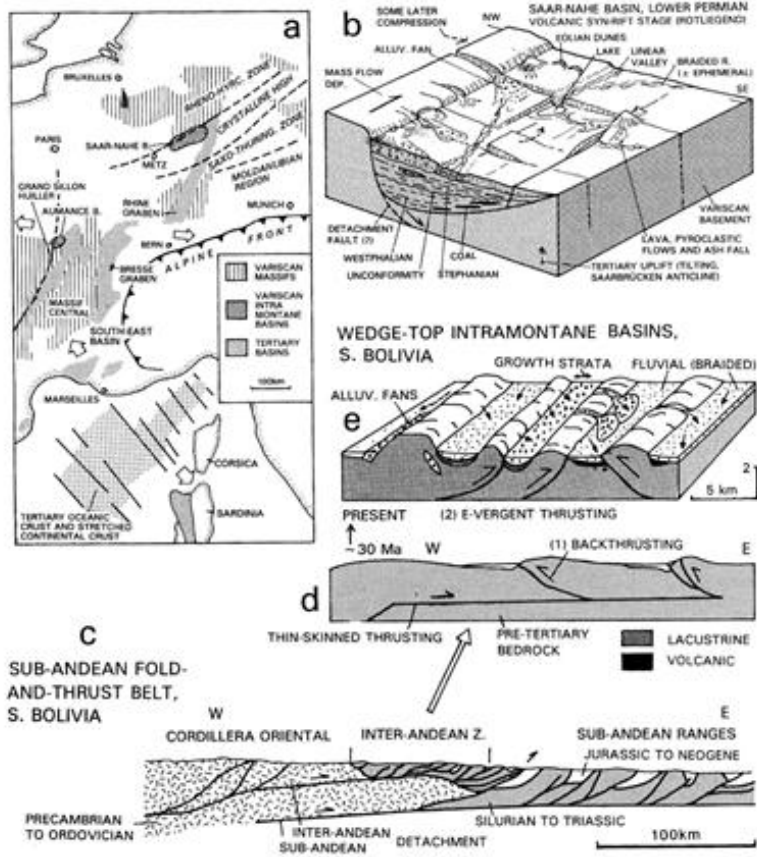
fan).

Záleží na typu kolize (kolize kontinent-kontinent vs. kolize dvou vnitrooceánských oblouků (Moluky)- různé typy kůry, velmi rozdílný přínos sedimentu do pánve.

Finální začlenění těchto sedimentů do orogenního systému.

Hlavní zdrojovou oblastí jsou sedimenty příkrovové fronty- recyklace materiálu- vyšší zralost (křemenné a litické písky a pískovce).

Vnitrohorské pánve



Role vulkanismu

Obrázek 17: Vnitrohorské pánve (Allen, 2005)

Pánve spojené s kontinentálním únikem („extruzí“)

Kontinentální kolize, zkrácení kontinentální kůry je částečně transformováno do laterálního úniku přilehlých krustálních fragmentů, transprese i transtenze, rozsáhlé horizontální posuny.

Nepřavidelný tvar, mocnost a měrná hmotnost kolidujících bloků

Příklady: Indočína (oblast Červené řeky), Východní Alpy, Egejské moře

Pánve panonského typu

Rozsáhlé vnitrohorské pánve (pánevní systém vs. části pánve tj. jednotlivé pánve)

Ztenčená kontinentální kůra v podloží, původně často „retro-arc“ pánve

Složitý strukturní a depoziční vývoj

Extenze spojená s migrací aktivity vrásnění do předpolí („subduction rollback“), role kontinentálního úniku

Kontinentální kolize

Finální stadium tvorby pásebného pohoří

Extenze v rámci úzkých příkopových struktur uvnitř nebo v zázemí příkrovů

Obvykle paralelní orientace s orogénem, ale i šikmá či kolmá orientace (orogenní kolaps a únik). Protáhlý, úzké tvar pánve.

Vnitřní segmentace, postdepoziční komprese, horizontální posuny.

Počátek sedimentace pobřežní či mělkomořské sedimenty, výše fluviální a aluviální sedimenty.

Kompletně terestrické sedimenty- rychle vyplňování pánve-vysoký gradient.

Střídání FU cyklů (extenze) a CU cyklů (komprese), místní provenience, klimatické vlivy

Rychlejší a dřívější subsidence blíže k orogennímu pásmu než v centrální části
Často CA nebo A vulkanismus

Trend vyplňování: kontinentální sedimenty následované mělkomořskými-poměrně hlubokovodní sedimentace-změlčení, brakická, jezerní a fluvialní sedimentace.

Pánve na deskových rozhraních s horizontálními posuny

Rozhraní desek není přímé, pohyb není přímo čistý horizontální posun paralelně s okrajem desky, systém větviček se zlomů

Kontinentální i oceánská kůra

„Strike-slip“ pánve

Transtenze (extenze) a transprese (komprese)

Transformní a transkurentní zlomy

Inverze zlomů

Překryv zlomů vede k vzniku extenzní oblasti mezi nimi – pánve typu „pull-apart“

Charakteristický tvar, rozměry, hloubka, rychlá subsidence.

Hrubozrná sedimentace poblíž okrajů (aluviální kužely, kuželové delty) rychlý přechod do marinních sedimentů. Faciálně velmi pestré vertikálně i laterálně. Asymetrická výplň

Pohyby ker podél okrajů, změny depozičních center i zdrojových oblastí

Kontinentální pánve typu „pull-apart“ (aluviální, fluvialní a jezerní sedimenty –citlivé ke klimatickým a tektonickým procesům)

Marinní pánve typu „pull-apart“ (relativně hlubokovodní sedimentace, turbidity, změlčování do nadloží)

Příklady:

Vídeňská pánev

Údolí řeky Jordanu (Aquaba záliv, Mrtvé moře, Galilejské jezero)

Komplexní a přechodné (polyfázové) pánve

Změna tektonického režimu v čase (vazba k Wilsonovu cyklu)

Interakce několika tektonických režimů

Nejrůznější směry pohybu litosferických desek

Obvykle horizontální posuny komplikují situaci na konvergentních či divergentních okrajích desek.

Spojení extenzní tektoniky a horizontálních posunů – Kalifornský záliv (směs charakteristik „pull-apart“ pánve a proto-oceánského příkopu).

Deformace dřívější pánevní výplně

Několik fází strukturního vývoje pánve a sedimentace

Inverze pánve – protichůdná změna původního pohybu/režimu (extenze-komprese)

Změna termální subsidence, akumulace sedimentu, napětového pole.

5. Subsidence

Základní termíny

Tektonická subsidence (izostáze, termální kontrakce litosféry, fluxurní prohnutí)

Subsidence spojená se zatížením sedimenty

Celková subsidence

Subsidenční křivka

Izostáze (funkce hustoty a mocnosti) – litosféra vs. astenosféra

Spodní hranice litosféry termální hranice (cca 1350° C)

Teplejší astenosféra má mírně nižší hustotu než nadložní litosféra
 Zvětšení mocnosti kůry na úkor pláště (litosféra) vede k výzdvihu
 Zvětšení mocnosti pláště na úkor kůry (litosféra) vede k subsidenci.
 Procesy ztenčování/naduřování litosféry díky extenzi/kompresi
 Výstup plášťového materiálu jako odraz ztenčování kůry
 Nárůst/pokles hustoty litosféry je spojen s jejím ochlazením/zahřátím, průnikem magmatu, tavením kůry/krytalizací magmatu a fázovými změnami minerálů
 Subsidence vyvolaná zatížením
 Zatížení s relativně malým dosahem-rozprostření do širší oblasti-nižší subsidence než je k kompenzační hloubka
 Zatížení s dosahem větším než mocnost litosféry a dlouhou dobou zatížení pokles minimálně v centru na hodnotu izostatického vyrovnání.

Subsidenční historie pánve

Určení typu subsidence

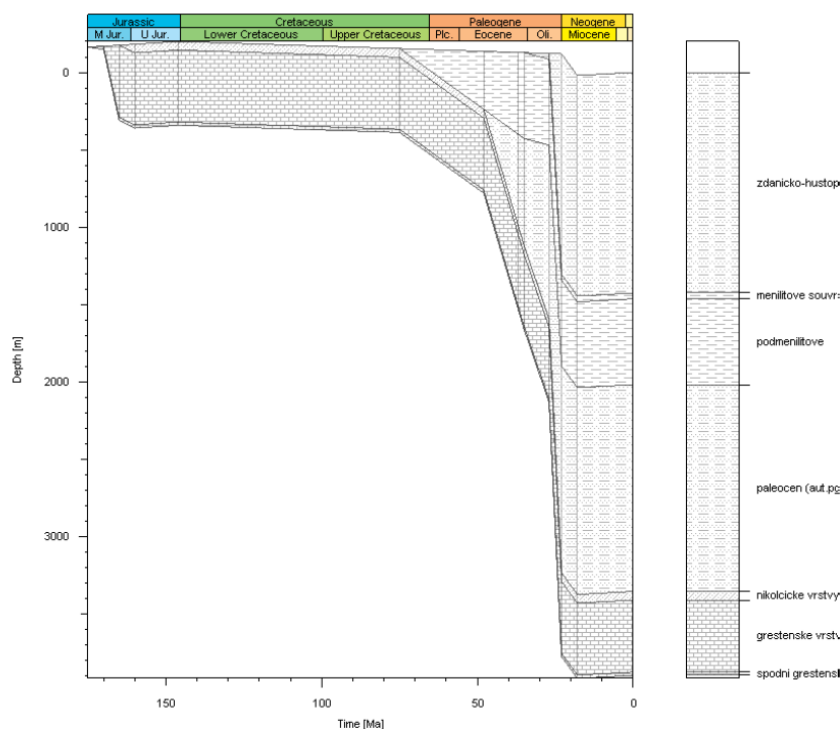
Subsidenční křivka ve vztahu k sedimentační rychlosti, historii vyplňování pánve, změny hladiny, hloubky depozice (celková subsidence)

K určení subsidenční historie pánve je nutná znalost (v určitém místě) stratigrafie (bio- i chronostratigrafie), paleoprostředí, paleohloubek a relativních změn hladiny

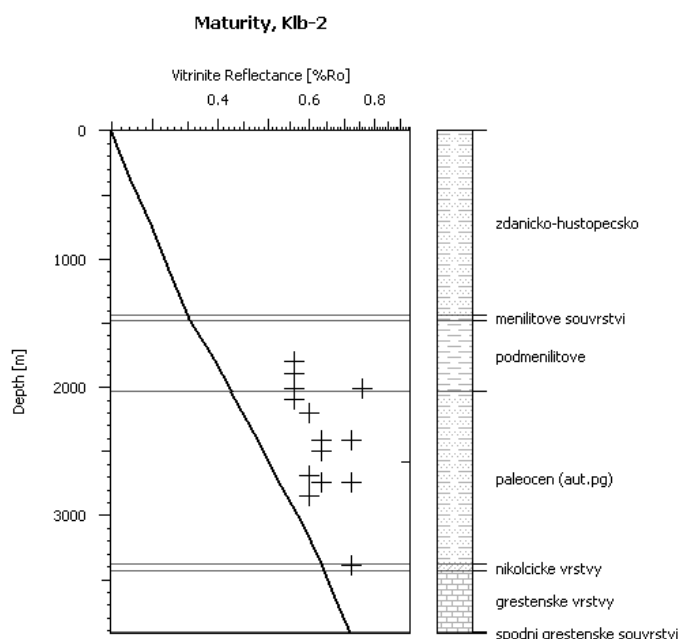
Určení tektonické subsidence – metoda „backstripping“ (odstranění efektu kompakce, naložení sedimentu, změn paleobatymetrie a hladiny)

Subsidenční modely s využitím programu Petromod 1D

Programy firmy Schlumberger jsou hojně užívané v sedimentologické a naftařské praxi. Pro studium subsidenční historie se využívá program Petromod.



Obrázek 18: Subsidenční model bez eroze (Goldbach, 2012)



Výše uvedený subsidenční model je modelem „bez erozní činnosti“. Ukazuje prostou akumulaci sedimentu v rámci sedimentačního prostředí.

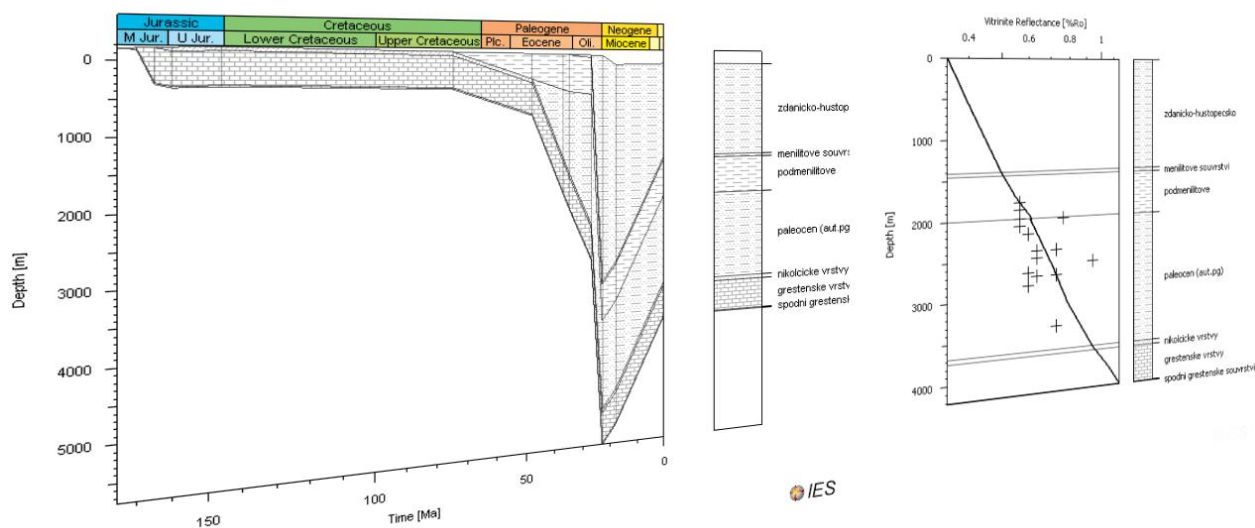
Pro zjištění erozní činnosti a kalibraci se využívá především teplot T_{max} z analýzy RockEval a odraznost vitrinitu (R_o). Vlevo model bez eroze ukazuje značné chyby. Kalibrační body jednoznačně ukazují na značnou erozní činnost v geologické minulosti.

Pokud budeme počítat s erozí v časovém intervalu 37-23MA let (období mezi sedimentací autochtonního paleogénu a



násunem příkrovů ZK a erozí v období 23-0, kalibrační model maximálních teplot bude vypadat takto:

Erozí 2000m sedimentu v intervalu 23-recent a 1000m sedimentu v intervalu 37-23Ma. Křivka maximálních teplot, kterým hornina byla vystavena výrazně lépe odpovídá kalibračním bodům.



Obrázek 19: Subsidenční model s erozí (Goldbach, 2012)

Pokud klasifikujeme horniny, kterým program následně přiřadí konkrétní modelové parametry, například teplotní vodivost, hustotu atd., můžeme modelovat teplotu, respektive přítomnost či nepřítomnost plynného či ropného okna.

Dekompakce sedimentu

Původní mocnost sedimentu

Sedimentární sled (současná mocnost, průměrná porostita)

Křivky změny porosity s hloubkou

Nutno vypočítat pro jednotlivé sledy

Subsidence modelových pánví

„Forward modeling“ – zohledněny krustální parametry za účelem zjištění termální/tektonické subsidence. V další fázi je zohledněn efekt zatížení (hloubka, mocnost sedimentu, změny hladiny).

Riftové pánve – rychlá často lineární iniciální subsidence, následovaná dlouhodobou postupně klesající termální subsidencí. Procesy riftingu a korové extenze mohou mít několik fází, subsidenční křivka má pak opakovaně rostoucí gradient.

Subsidenční rychlost na pasivním okraji narůstá směrem k vnějšímu okraji díky ztenčování kůry a chladnutí oceánské kůry.

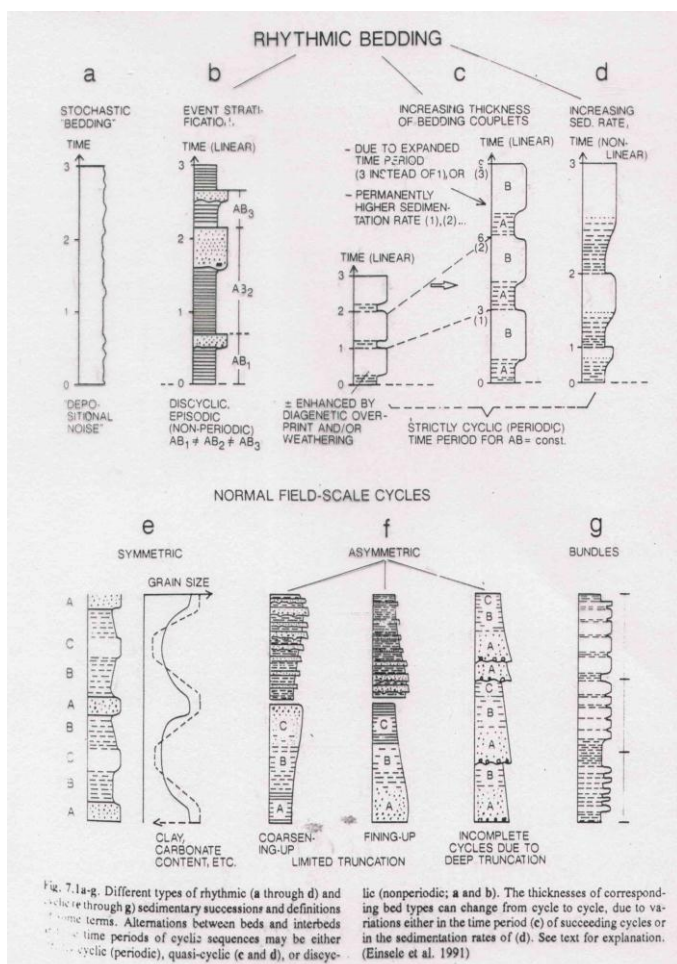
Pánve spojené s kontinentální kolizí (reliktní oceánské pánve, předpolní pánve) a zaobloukové pánve jsou typické konvexním tvarem částmi subsidenční křivky. V pozdějších stádiích vývoje těchto pánví dochází ke zpomalování subsidence a výzdvihu.

Riftové, „pull-apart“, pasivní kontinentální okraje a oceánské pánve mají spíše konkávní tvar subsidenční křivky (postupný pokles rychlosti subsidence).

Epizodické vrásnění, horizontální posuny, vulkanismus a změny ve flexurním chování podloží mohou vést k nepravidelnému tvaru subsidenční křivky.

6. Základy sekvenční stratigrafie

Vrstevní sledy



Obrázek 20: (Einselle, 2000)

Odraz sedimentárních událostí a cyklů v paleontologickém záznamu

Bentické organismy

Postupné změny –

Rychlé změny – katastrofy, rozdíly ve fosilním společenstvu (turbidity, transgrese a regrese v mělkomořských podmínkách) – koncentrace schránek

Diagenetická modifikace

Sekvenční stratigrafie

Prostorový vztah, geometrie i relativní stáří rozdílných těles (facií) sedimentů vyplňujících sedimentární pánve

Korelační a paleogeografická metoda

Určení a popisu klíčových diskordantních a konkordancí horizontů (*key surfaces*), studiu časového i prostorového vztahu sedimentárních facií a pochopení genetických vztahů a procesů, které vedly k jejich vzniku.

Pravidelně se střídající vrstvy

Vrstva (bed) a mezivrstva („interbed“) – dvojice vrstev („bedding couplet“)

Mocnosti

Rytmicita – sukcese AB, AB, AB

Dvě odlišné kategorie rytmicity

Rychlé změny v depozici (depoziční eventy) – „náhodné“ události – turbidity, povodňové sedimenty, pyroklastický spád

Opakované, pozvolné, relativně pomalé a postupné změny – cyklická nebo periodická vrstevnatost

Trendy změny zrnitosti ve vrstevních sledech.

Mocnosti cyklických a rytmických sledů – prostorové a časové hledisko

Symetricka a asymetricka (kompletnost a nekompletnost) v depozičních cyklech

Hierarchie v depozičních cyklech

Interference depozičních cyklů – různý původ a frekvence cyklů

Cykly s nejkratší periodou jsou nejvíce zřetelné

Fyzikální a biologické mechanismy cyklicity

Ve spojení s biostratigrafií a chronostratigrafií umožňuje rekonstruovat subsidenční historii pánve.

Predikce rozmístění facií v rámci různých částí pánve.

Geometrie sedimentárních těles (odkryvy, podpovrchová data)

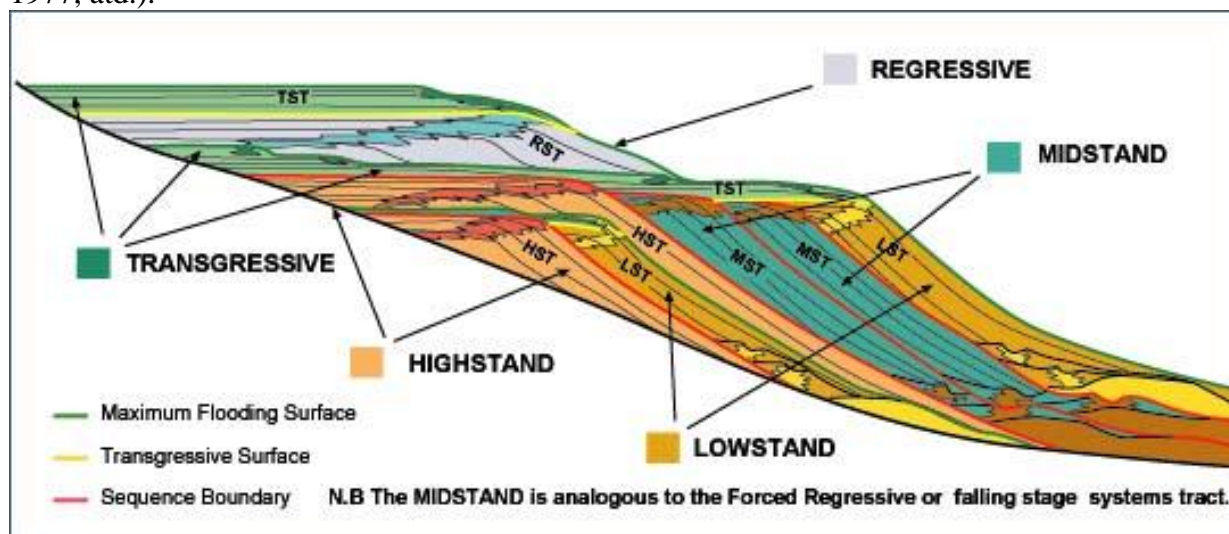
Architektonické jednotky (*architectural elements*)

Plochy nespojitosti (erozní povrch, povrch nesedimentace, atd.).

Prostorová korelovatelnost těchto ploch (*bounding discontinuities*), možnost jejich rozpoznání podpovrchově (karotážní diagramy, seismické řezy) a jejich stratigrafickému významu

Alternativní stratigrafické techniky - allostratigrafie, cyklostratigrafie, seismostratigrafie a sekvenční stratigrafie

Pasivní okraje kontinentu (eustatické změny) - „Exxon group“ (Vail, Mitchum, Thompson 1977, atd.).



Obrázek 21: Sekvenční stratigrafie (AAPG news, 2012)

Sedimentární záznam v depozičních pánvích

Interpretace horninového záznamu - faktory ovlivňující sedimentaci.

Rozložení a charakter depozičních systémů - analýza rozmístění a tvaru sedimentárních těles.

Řídící faktory depozice, prostorového a časového rozložení těles a změn stávající situace.

Vztah mezi depozičním prostorem (*accommodation space*) tj. prostorem vhodným k vyplnění sedimenty a sedimentem transportovaným a deponovaným v tomto prostoru včetně produktů biogenní či chemogenní produktivity (*sediment supply*).

Depoziční prostor může být vytvořen růstem hladiny nebo poklesem dna (subsidencí). Role hladiny moře - pohyb březní čáry – změny hladiny - role spádové křivky

Vazba depoziční prostoru vs. přínos sedimentu - vertikální a/nebo horizontální změny depozičního prostředí v geologickém záznamu.

Agradace

Progradace

Retrogradace

Cyklické změny

Sekvence a trakty

Depoziční sekvence je definována jako stratigrafická jednotka ohraničená diskordantními plochami (*unconformities*) nebo s nimi korelovatelnými plochami konkordantními (*corelated*

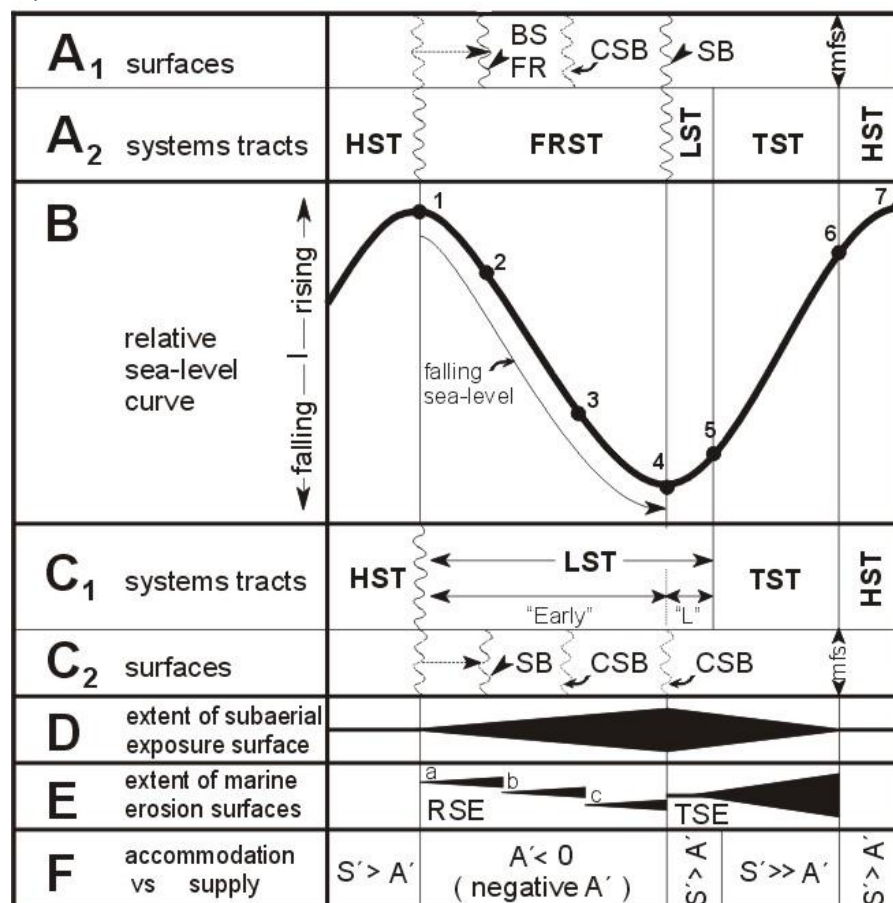
conformities). Tělesa sedimentů uložená během jednoho cyklu poklesu a růstu relativní hladiny (významná změna hladiny).

Mocnost depoziční sekvence

Hranice sekvencí - pokles hladiny – diskordance (s nimi korelovatelné plochy).

Dva typy hranice sekvence. Sekvenční hranice typu 1 je spojena s výraznou subaerickou erozí díky změně sklonu spádové křivky (*stream rejuvenation*) a výrazným posunem facií ve směru do pánve. Sekvenční hranice typu 2 nevykazuje rysy výrazné subaerické eroze a posun facií směrem do pánve je jen slabě zřetelný.

Cyklus poklesu a růstu hladiny (t.j sekvenci) lze zjednodušeně znázornit jednoduchou sinusoidální linií. Na základě procesů a sedimentů bývá rozdělen na jednotlivé trakty (*systems tracts*).



Obrázek 22: Sekvence a trakty (Allen, 2005)

Trakty - skupiny současně uložených depozičních systémů/ekvivalent seismostratigrafických jednotek. Definice dle pozice v rámci cyklu změny relativní hladiny a omezení klíčovými povrchy/plochami (*key surfaces*), které odrážejí změny v úrovni relativní hladiny. Klíčové povrchy nejsou vždy přísně synchronní v celé pánvi, neboť vznikaly postupně na základě plošné expanze či kontrakce erozního či depozičního prostředí. Obvykle jsou v rámci sekvence vydělovány 3 až 4 trakty.

Transgresivní trakt (TST) – odpovídá periodě nejrychlejšího růstu hladiny, celkový posun facií směrem do pevniny (retrogradace). Báze - transgresivní povrch (*flooding surface/transgressive surface*), spojený s erozními procesy. Je-li tato eroze vyvolána činností příboje a vlněním hovoří se o přesněji o „*ravinement surface*“. Redukovaná sedimentace v hlubších částech pánve. Depozice, agradace fluvialních sedimentů a vyplňování zakleslých údolí.

Pokles rychlosti růstu hladiny - pokles rychlosti tvorby akomodačního prostoru- agradace sedimentu. Vrchol růstu hladiny – hranice tvorby akomodačního prostoru- progradace sedimentu- změlčování sedimentáčního prostředí. Sled sedimentů s rysy agradace a progradace - trakt vysoké hladiny (*highstand systems tract* - HST). Plocha maximální záplavy (*maximum flooding surface* - MFS), představuje nejvzdálenější zásah marinního prostředí do kontinentu. Odděluje TST a HST (změna od retrogradace do agradace/progradace). Na seismických řezech – downlap. Mělkomořská a hlubokomořská depoziční prostředí - velmi nízká rychlost sedimentace - kondenzovaná sedimentace.

MFS a „*genetic stratigraphic sequences*“ Galloway (1989).

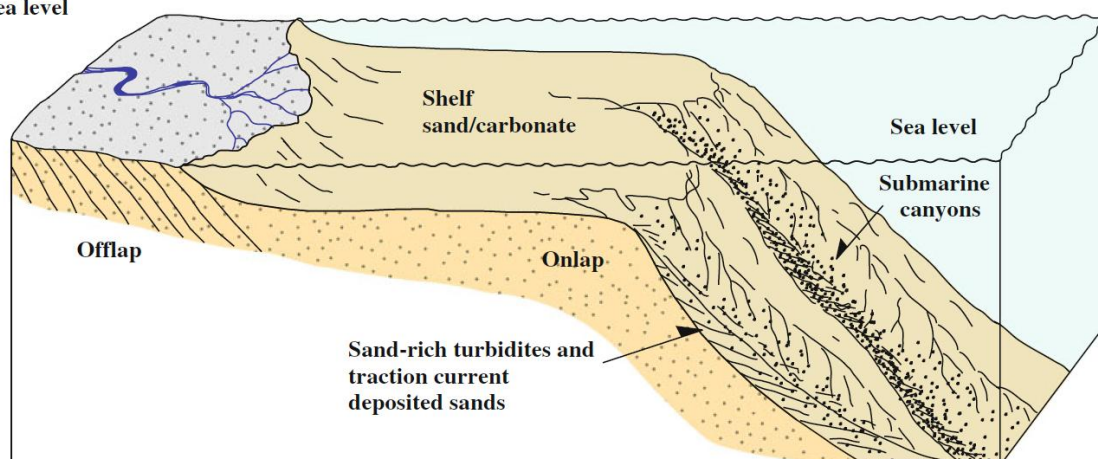
Regresivní povrch (*regressive surface of marine erosion* - RSME) - pokles relativní hladiny - odkrytí a eroze dříve uložených především mělkomořských/šelfových sedimentů. Depozice především ve vnitřních částech pánve.

Pokles hladiny až po morfologicky výrazný okraj šelfu- sedimentace především na svazích šelfu a jeho úpatí (hlubokovodní sedimenty) - trakt nízké hladiny (*lowstand systems tract* - LST).

Nevýrazný okraj šelfu mírně se svažující- výraznému posunu depozičních prostředí do pánve - trakt padající hladiny (*falling stage systems tract* nebo *forced regressive wedge systems tract*).

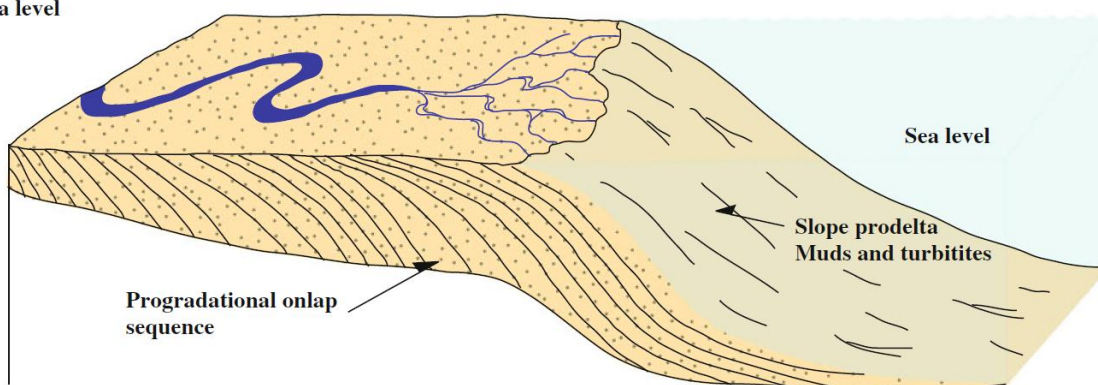
Kompletnost a nekompletnost sekvence

Highstand Sea level



Obrázek 23: Highstand sea level (Bjorlyke, 2010)

Lowstand Sea level



Obrázek 24: Lowstand sea level (Bjorlyke, 2010)

Depoziční sekvence v rámci karbonátové sedimentace

Vliv změn relativní hladiny

Nejvýraznější rozdíl - mechanismy karbonátové sedimentace a vlastnostmi karbonátů. Dominantní karbonátová produkce - mělkomořské prostředí - TST a HST - velká rozloha mělkého zaplaveného šelfu.

Rychlý růst karbonátů - fixace jednotlivých depozičních prostředí – agradace - velké mocnosti. Rozdílná rychlost tvorby karbonátů v rámci karbonátové platformy (prostor, čas, typy platform, klima, lokální tektonika) - sklon svahu a rychlost relativního růstu hladiny. Pohřbení platformy a překrytí hlubokomořskými sedimenty.

TST - zvětšení rozsahu karbonátové platformy a tvorba její největší části. Transport karbonátů z platform do pánve (*highstand shedding*). V rámci siliciklastické sedimentace - hlavní množství sedimentu dodáváno do hlubších částí pánve během LST.

Relativní pokles hladiny - odkrytí šelfu - eroze odkrytých karbonátů (klima - krasovění vs. aridní sebcha). Vznik osypů a gravitačních proudů - kalciturbidity atd..

Výrazná disproporce mezi rychlostí agradace sedimentu na karbonátovém šelfu a v hlubších částech pánve (pelagity) - zdůraznění role svahu – detrit materiálů.

Karbonátová tělesa – morfologie - rezistence vůči mechanické erozi - postdepoziční diagenetické pochody.

Morfologie a rozsah karbonátových šelfů vs. morfologie a rozsah šelfů s klastickou sedimentací.

Parasekvence a sedimentární cykly

Detailnější prvky cyklu růstu a poklesu hladiny - komplikovaný proces.

Progradující těleso sedimentů v rámci HST - řada menších vrstevních sledů s nahoru hrubnoucím (progradující) trendem. Parasekvence (*parasequence*) je definovaná jako relativně konformní sled geneticky příbuzných vrstev nebo souboru vrstev (vykazující nahoru změlčující trend, ukončený plochou mořské záplavy (*marine flooding surface*) nebo s ní korelovatelnými povrchy. Mocnost parasekvence je obvykle v jednotkách či desítkách metrů. Depoziční cykly – různá interpretace.

Plocha mořské záplavy vs. plocha maximální záplavy.

Hierarchie parasekvence vs. sekvence - hierarchie změn hladiny - důvody změn hladiny a řady cyklicity.

Změny hladiny

Změny v hloubce vody (vzdálenost mezi hladinou a dnem) se vyskytují na velké velikostní i časové škále.

Krátkodobé změny - vlnění, výčasy, bouřkové vlnění, klimatické změny atd.. Dlouhodobé změny - souhra eustatických změn, procesy tektonické, změny v přínosu sedimentu.

Řády cyklicity - hierarchie

Cykly prvního řádu – celosvětové, procesy vzniku a rozpadu superkontinentů, desková tektonika, délka řádu stovek miliónů let.

Cykly druhého řádu - periodičita desítky miliónů let, změny v rychlosti rozšiřování středoocéánských hřbetů, regionální tektonika, dlouhodobé procesy glaciace a deglaciace, změny subsidenční rychlosti. Menší možnost globálních korelací.

Cykly třetího řádu - periodičita 1 – 10 miliónů let, rozsah několik desítek metrů, změny regionálního napětového pole.

Cykly čtvrtého řádu – periodičita 200 000 až 500 000 let

Cykly pátého řádu – periodičita 10 000 až 200 000 let, změny hladiny v rozsahu max. 10 až 20 m (kvartér - větší rozsah).

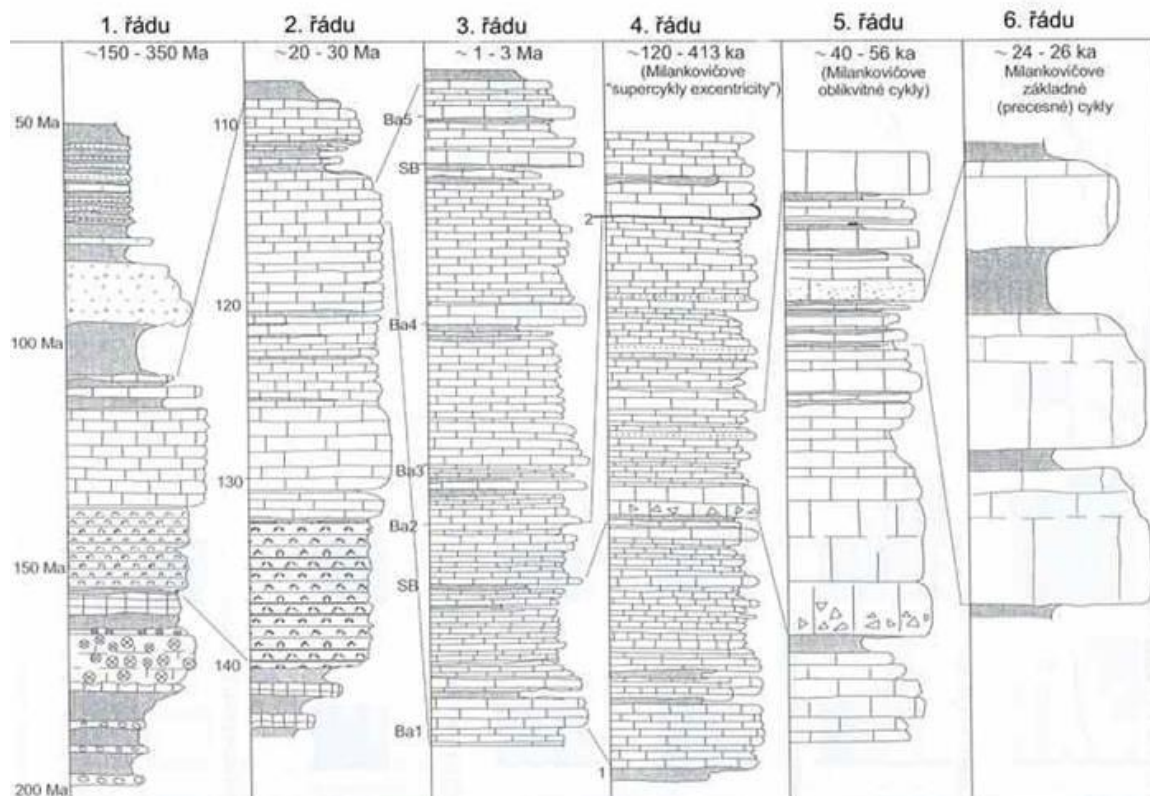
Cykly 4 a 5 řádů – parasekvence, Milankovičovy cykly.

Naložení cyklů vyššího řádu na cykly nižšího řádu

Globální/eustatické změny hladiny - změny v rozsahu oceánských pánví, změny v množství vody, změny geoidu. Změny hladiny světového oceánu ve vztahu k pevnému bodu planety (např. střed Země). Korelace pobřeží rozdílných kontinentů. Globální křivka změn hladiny (*global sea level curve*) - Vail et al. 1977 a Haq et al. 1988.

Relativní změny hladiny - lokální či regionální procesy (pohyby na zlomech, termální subsidence, vulkanismus, sedimentární kompakce, plošně lokalizovaným přínosem sedimentu, atd.). Vliv na sukcese sedimentů a stratigrafii pánve, omezeně korelovatelné.

Autocyklické procesy vs. allocyklické procesy



Obrázek 25: Hierarchické členění sekvencí od supersekvencí až po základní (precesní) Milankovičovy cykly v sedimentárním záznamu (podle Michalíka et al., 1999).

Seismická stratigrafie

Studium seismických profilů - tvary těles sedimentů, rozlišení konformních a nekonformních hranic, tektoniky, interpretace horninových sledů. Prostorové vztahy „seismických reflektorů“ a jejich tvar - prvky geologické stavby. Velikostní škále (odkryv vs. seismický řez).

„Horizontálními reflektory“ vs. tělesa sedimentů s výrazně ukloněnými ohraničeními (*clinoforms*).

Charakter ukončení jednotlivých reflektorů (*reflector terminations*)

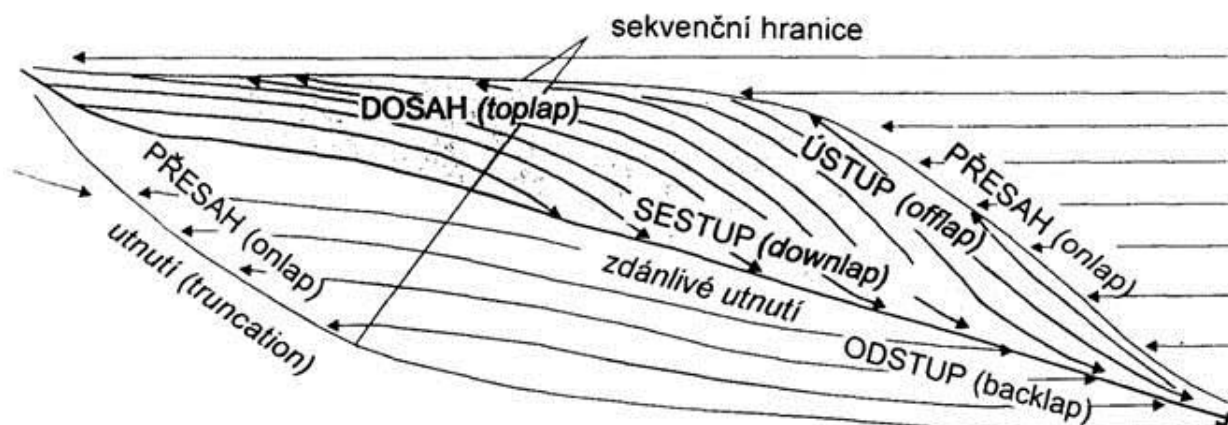
Deskriptivní terminologie

„Onlap“ - horizontální vrstva je ukončena kontaktem s ukloněným povrchem

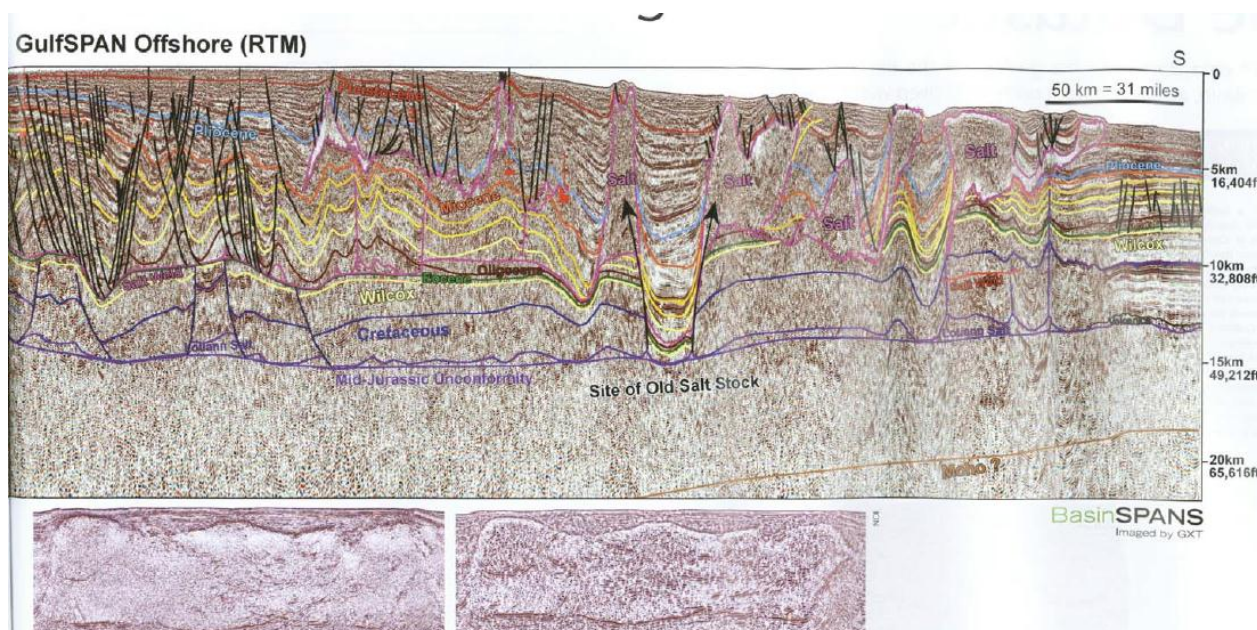
„Downlap“ - ukloněné vrstvy jsou ukončeny (vykliňují) po sklonu na původně horizontálním či ukloněném povrchu

„Toplap“ - Ukončení vrstev na diskordanci spojené s postdepoziční erozí. Vyskytuje se ve svrchních částech sekvencí.

„Offlap“ - ukončení vrstev, kde mladší a mladší sedimenty zasahují stále méně ve směru do pevniny (dochází k částečnému odkrytí starších vrstev).



Obrázek 26: základní prvky sekvenčně-stratigrafických rozhraní (Einselle, 2000)



Obrázek 27: interpretovaný seismický obraz území (AAPG news, 4/2012)

7. Diagenese - úvod

Čerstvě uložené sedimenty- nezpevněné, nízká měrná hmotnost, obsah vody

Proces diagenese

Katagenese-anchimetamorfóza – břidlice, smektit a smíšené jílové minerály jsou nahrazeny dobře vykrystalovaným ilitem a chloritem, vysoká odraznost vitrinitu - teploty 100-150°C.

Mechanická diagenese – tlak – odstranění vody a změna stavby sedimentu

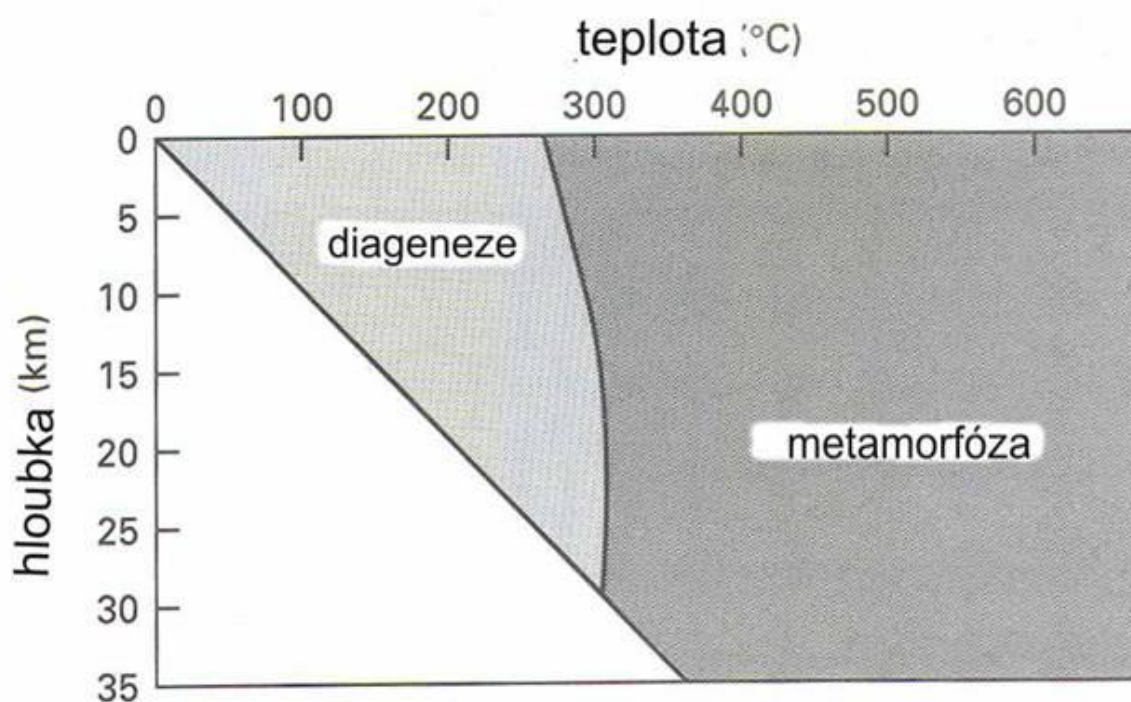
Chemická diagenese – rozpuštění a rekrystalizace, vysrážení ve formě cementu

Rozpuštění a cementace v různé úrovni – pohyb materiálu

Snaha po získání termodynamické stability v podmínkách pohřbení (růst teploty, tlaku a měnící se chemismus pórových vod). Limitované množství stabilních minerálů se tvoří na úkor množství nestabilních minerálních fází (illit-chlorit-křemen, dolomit, kalcit vs. jílové minerály, aragonit atd.).

Redukce porosity a permeability/změna mocnosti, nárůst měrné hmotnosti – kompakce sedimentu.

Vytlačení pórové vody – „kompakční proud“.



Obrázek 28: Hloubka a teplotní interval diagenese (Nichols, 1999).

Stadia konsolidace sedimentu

Fyzikální vlastnosti sedimentu (porosita, obsah vody, hustota, propustnost, pevnost ve smyku, reologické vlastnosti....)

Tři stadia konsolidace:

Normální konsolidace – rovnováha mezi stupněm konsolidace a okolním tlakem, normální depoziční rychlost a dostatek času pro únik pórové vody.

Nedostatečná konsolidace („underconsolidation“) – vysoká depoziční rychlost, nízká permeabilita nadloží, zadržování pórové vody, snížení pevnosti ve smyku, gravitační proudy)

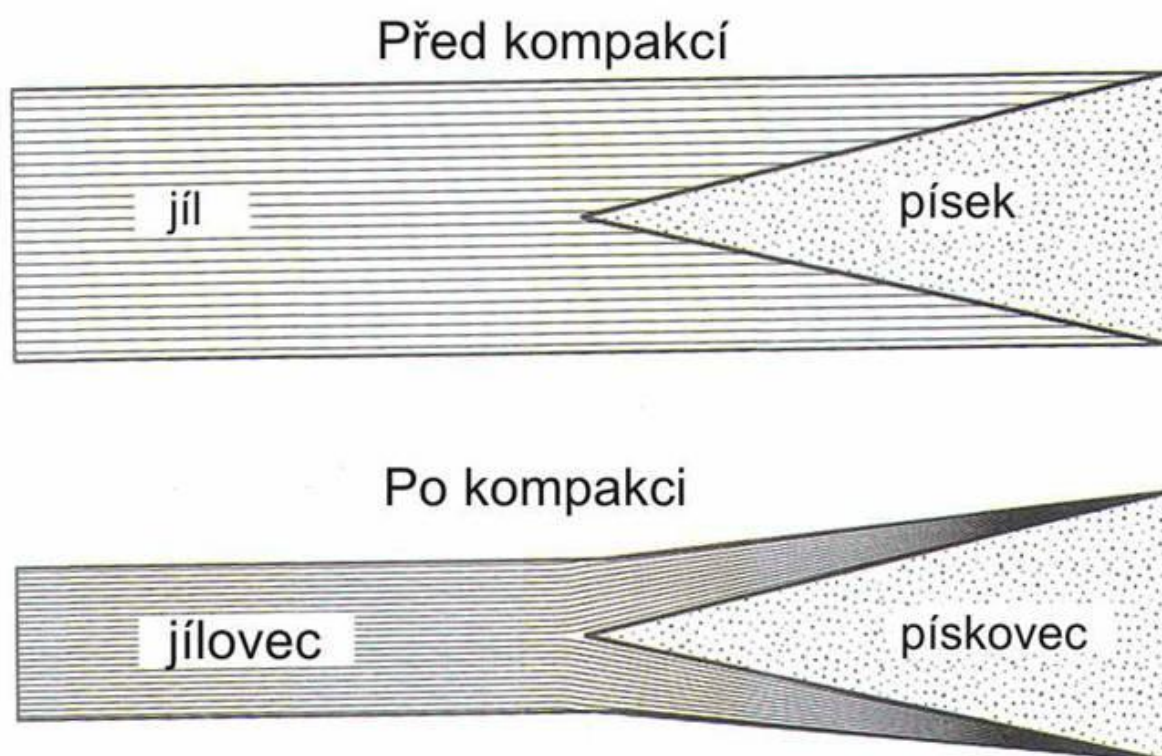
Přebytečná konsolidace („overconsolidation“)- kohezivní, většinou jílovité sedimenty. Obvykle spojeno s erozí.

Porosita v určité hloubce je nepřímě úměrná velikosti zrn a závisí na jejich typu.

Kompakce jílu a písku

Čistě mechanická diagenéze- Pravidelný pokles porosity s hloubkou, pohřbené polohy písku rychlejší pokles porosity. Ve velkých hloubkách pohřbení naopak vyšší porosita pískovců než okolních břidlic (bez vlivu cementace).

Role chemické diagenéze – při hloubce pohřbení několika set m nestabilní součástky jemné frakce (bioklasty) se začínají rozpouštět a přecházejí do pórového cementu. Ve větších hloubkách nestabilní jílové minerály přecházejí do stabilních („zrají“), což vede ke ztrátě krystalické vody. Cementace a tlakové rozpouštění poblíž kontaktů zrn vede ke snížení porosity.



Obrázek 29: Schématický rozdíl mezi kompakcí jílu a písku (Nichols, 1999).

Kompakce pelagických karbonátů

Skoková změna porosity s hloubkou, role teplotního gradientu.

Kompakce silicitů

Vyšší iniciální porosita než u karbonátů. Skoková změna – přechod opálu A do opálu CT v hloubkách 100 až 300m. Role teplotního gradientu.

Smišené siliciklasticko-karbonátové sedimenty

Velmi nepravidelné změny

Rychlejší konsolidace nestabilních sedimentů (aragonit, vysoce hořecnatý kalcit, opál) proti jílovitým polohám, které si zachovávají vyšší porositu – tvorba kongrecí.

Sedimenty s rozptýlenou organickou hmotou – iniciální vysoká porosita.

Koeficient kompakce

Idealizovaný model – horizontální tělesa sedimentů, stejná hmota/mocnost.

Redukce porosity vs. nárůst hloubky pohřbení

Využití vhodných objektů – fosilní stopy, schránky organismů, pevné klasty či konkrece

Diferencovaná kompakce

Vrstvy s rozdílnou kompakcí, ukloněné či nepravidelné dno pánve.

Struktury karbonátových rifů – malá kompakce – zvýšení reliéfu

Reliéf písčitéch koryt v jemnozrnných sedimentech mimo koryto

Zlomy v případě kompakce vrstev na prudkém reliéfu či syntetický zlomový systém nad ukloněným dnem pánve.

Deltové sedimenty – výplně koryt, ústových valů na sedimentech plošiny či prodely – větší zatížení- nárůst kompakce – růstové zlomy.

Podpovrchové proudové režimy

Pohyb pórové vody – kompakční/advekční proud – vzhůru skrze sediment nebo po ukloněných propustnějších polohách laterálně. Pohyb vyvolán zatížením sedimenty nebo tektonickým postižením. Nízká rychlost pohybu obvykle odráží rychlost depozice.

Další podpovrchové proudy

– meteorický proud (role gravitace), kontinentální sedimenty a částečně v rámci vynořených marinních sedimentů. Velmi důležitý pro rozpouštění a opětovné vysrážení minerálních fází.

-termobarometrický proud (výsledek teplotních/tlakových procesů – dehydratace jílových minerálů a minerálů s vázanou OH) – větší hloubky pohřbení vysoké tlaky. Obsah metanu, CO₂, H₂S – výsledky termální alterace organické hmoty.

-konvekční proud (hustota) – vody s různou hustotou (teplota, salinita)

Rozdílná role jednotlivých proudů v různých typech pánve a jejich věku/evoluci. Termobarometrický a konvekční proud jsou velmi významné pro chemickou diagenézi v rámci hluboce pohřbených sedimentů.

Základní procesy chemické diagenéze

Rozpouštění a alterace termodynamicky nestabilních minerálů, přemístění starších a vysrážení nových minerálních fází

Rozpuštěný materiál je po povrchem transportován molekulární difuzí (krátká vzdálenost) nebo různými proudovými systémy (pánevní škála)

Časná diagenéze („eodiagenéze“) především kontinentálních a vynořených marinních sedimentů je ovlivněna především depozičním prostředím (humidní vs. aridní, oxidační vs. redukční), topograficky řízeným pohybem meteorické vody, pedogenezí nebo migrací sebchových solných roztoků (vadózní, freatické a marinní cementy).

Pískovce – diagenéze s tvorbou hematitu, anhydritu a jílových minerálů (red-beds)

Jílovité sedimenty pod hladinou vody s obsahem organické hmoty mohou být významně ovlivněny redukcí sulfátů a tvorbou metanu (vznik pyritu a karbonátových kongrecí).

Kompakce křídly a organogenních silicidů - řada kroků

Diagenéze při hlubším pohřbení souvisí s tlakovým rozpouštěním na kontaktu zrn (nejprve karbonáty, nad 1 km i křemen). Nestabilní fáze SiO₂ přechází do stabilních (částečný únik SiO₂ a H₂O).

Mísení pórových fluid s rozdílným složením může vést ke vzniku druhotné porosity a vysrážení nové minerální fáze.

Výzdvih a exhumace hluboce pohřbených sedimentů je doprovázena meteorickou cirkulací vody – dedolomitizace, cementace kalcitem s nízkým obsahem Fe.

Termální historie pánevní výplně

Konduktivní tepelné proudění - původ v hlubší kůře

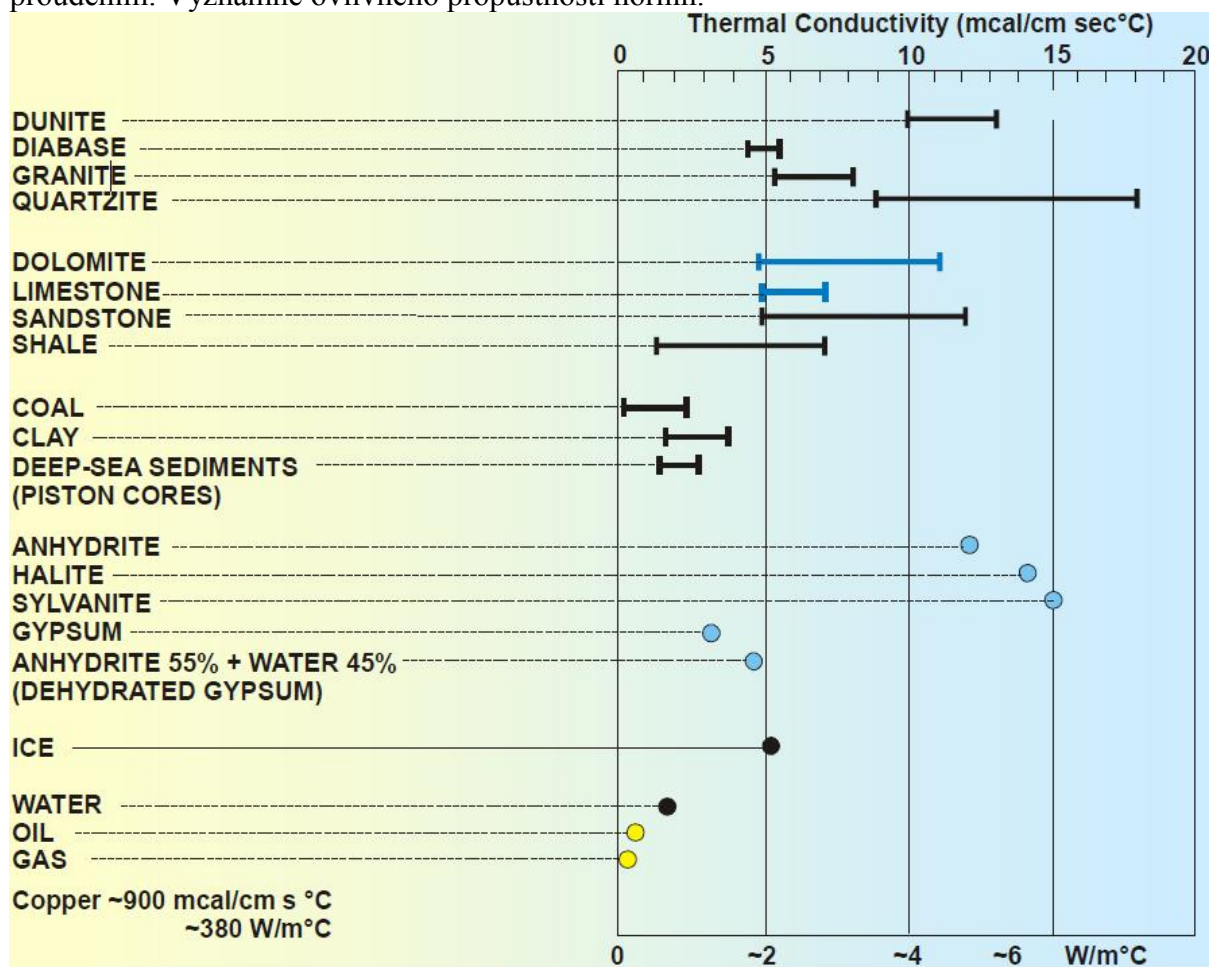
Adjektivní tepelný transfer díky cirkulaci meteorické vody

Rozdíly v tepelné vodivosti

Rekonstrukce termální historie pánve – riftová pánev nejprve fáze zvýšeného konduktivního tepelného proudění/zvýšený tepelný gradient, po přechodu do pasivního okraje jeho snížení.

Termální efekt subsidence následovaný výzdvihem – pásmová pohoří

Termální efekt meteorické vody – modifikace tepelné distribuce získané konduktivním prouděním. Významně ovlivněno propustností hornin.



Obrázek 30: rozdílná teplotní vodivost jednotlivých typů hornin (z prezentace J. Franců)

Metody studia diagenetických procesů

Určení teploty, stupně a stáří diagenetických reakcí

Identifikace procesů rozpouštění a cementace – studium výbrusů, RTG, elektronový mikroskop, mikrosonda, katodoluminiscence

Maximální teplota – odraznost vitrinitu (teplota, čas), studium biogenních fosfátů

Fluidní inkluze v rámci sekundárních krystalů v puklinách

Stabilní izotopy O18 v rámci karbonátového cementu – určení teploty a hloubky pohřbení (mísení meteorické a organické vody, změny izotopického složení oceánské vody)

Určení časové posloupnosti termálních událostí – datování cementu či rekrystalovaných minerálů díky nestabilním izotopům (K-Ar datování)
Fission track v apatitu, vulkanickém skle atd. – blokovácí teplota

8. Fosilní paliva (plynné, kapalné a pevné uhlovodíky) a pánevní analýza

Zdrojové horniny – jemnozrnné sedimenty, které přírodně generovaly, generují či budou generovat a uvolňovat dostatečné množství uhlovodíků pro tvorbu akumulací ropy či plynu.

Potenciální zdrojová hornina – splňuje podmínky množství ale nedošlo dosud k dosažení dostatečné organické zralosti.

Roponosné břidlice obsahují termálně degradovaný/degradovatelný organický materiál (obvykle kolem 20% TOC, zbytek tvoří nerozpustné komponenty - kerogen).

Zachování organické hmoty závisí na: obsahu kyslíku ve vodě poblíž dna, sedimentační rychlosti a intenzitě benthické aktivity. Zóna bakterií fermentujících metan vs. zóna redukčních sulfátů. Výsledkem je zachování více či méně stabilní organické hmoty v sedimentu.

Změna organické hmoty díky pohřbení a nárůstu teploty – geochemické reakce – změna od biopolymerů ke geopolymerym (kerogen).

Malé množství organických sloučenin, které jsou podobné s výchozími – geochemické fosilie/biomarkery (evidence původu)

Dvě skupiny organické hmoty zdrojových hornin

Bitumen – rozpustná organická hmota v organických rozpouštědlech

Kerogen – nerozpustná organická hmota. Dominantní část TOC

Množství a složení kerogenu ve zdrojových horninách – posouzení potenciálu uhlovodíků

Čtyři typy kerogenu- Liptinit, Exinit, Vitrinit a Inertit.

Tvorba a migrace uhlovodíků

Vývoj organické hmoty

Maturace organické hmoty – první stupeň – diagenese (odstranění extrahovatelných humidních kyselin). Nezralá organická hmota – produkce biogenního metanu.

Druhý stupeň – katagenese (hlavní tvorba ropy a „vlhkého“ zemního plynu (konverze části kerogenu do uhlovodíků). Časně až středně zralé stadium – teploty mezi 60-80°C až 120-150°C produkce ropy (Těžká ropa - uhlovodíky s 15 atomy C s lehkými molekulami C8-15/parafiny, aromatické sloučeniny). Vysoká zralost- teploty nad 130°C, rozpad na lehké uhlovodíky C2-7 vlhký plyn.

Třetí stupeň – metagenese – tvorba metanu (suchý plyn).

Vazba k teplotě

Teplotní rozsah lze korelovat s hloubkou pohřbení je-li znám termický gradient pánve (historie pánve).

Množství ropy a zemního plynu, které může kerogen generovat při odpovídající teplotě a dostatečného času je rozdílné dle typu kerogenu

Typ I – 80-90%

Typ II- 60%

Typ III – 25 %

„Vypuzení“ a migrace ropy

Počátek, když nejnižší část zdrojové horniny dosáhne časně zralosti. Ropa se nejprve akumuluje v intergranulárních pórech. Postupné zaplnění ropou a vodou (rozdíly v hustotě, kapilaritě).

Primární migrace po vyplnění dostupného prostoru – směr vzhůru po nejširších pórech. Migrace díky rozdílu hustoty voda/ropa, vysoký pórový tlak díky pokračující kompakci málo propustného sedimentu - potencionální vznik puklin. Dlouhé časové období – dostatečná migrace. Při redukci tlaku uvolňování plynu z ropy, výplň póru (uhlí – CO₂ plyny). Pro primární migraci je důležitá přítomnost vložek propustných hornin (migrace těžkých uhlovodíků), u mocných nepropustných hornin – migrace ve vyšších stádiích maturace.

Druhotná migrace - uhlovodíky se po vypuzení z matečné horniny dostávají do vodou vyplněných širších pórů propustnějších hornin přes které prochází do hornin rezervoáru. Migrace je obvykle polyfázová (kapky ropy, kapky či bubliny zemního plynu) – migrace do strukturních elevací. Migrace díky vztlaku nebo hydrodynamicky. Póry ve hornině rezervoáru jsou vždy alespoň zčásti vyplněny vodou.

Příklady zdrojových hornin

Jezerní sedimenty – jezerní „black shales“ v časně riftových pánvích při jejich hlubším pohřbení – omezený rezervoárový potenciál malých jezer. Organická hmota je autochtonní (řasy – kerogen I) nebo z rostliny z okolí/vlhké tropické klima.

Marinní delty – zdrojové horniny ropy, plynu i uhlí, výhodné rezervoáry. Uhlí – deltová plošina. Uhlovodíky – deltové svahy (suchozemská i oceánská organická hmota velké množství a nízká koncentrace). Čelo delty a úst'ové valy tvoří vhodné písčité rezervoáry, které jsou při progradaci delty kryty jemnozrnnými sedimenty deltové plošiny. Velký přínos materiálu vede k rychlému pohřbení a termálnímu zrání organické hmoty.

Karbonátové šelfy (Blízký Východ)- pasivní okraje kontinentu a předpolní pánve

Složitě tektonicky porušený systém těles a evaporitů. Zdrojové horniny jsou vápnitě jílovce (kerogen II) izolovaných a „podvyživených“ vnitřních částí šelfu. Okolní reefy a jejich svahy slouží jako rezervoáry.

Obecné znaky – hloubka pohřbení matečných hornin 1500-3000m. Horniny transportační a rezervoárové jsou strukturně výše a mohou přijímat uhlovodíky. Obvykle centrální části pánve. Evapority či vodou saturované masivní břidlice a jílovce tvoří nepropustnou vrstvu. Migrace uhlovodíků nepřesahuje obvykle první desítky km, často v bezprostřední blízkosti matečných hornin.

„Naftový“ systém tvoří zdrojová hornina, hornina přes kterou dochází k transportu a rezervoárová hornina, krytá neprotustnou polohou.

Tvorba uhelných sedimentů

Uhlí zůstává v primárním tělese sedimentu.

Vznik rozsáhlých těles uhlí je spojen:

- vývoj suchozemského rostlinstva
- vysoká produkce rostlinstva za vhodných klimatických podmínek
- depoziční prostředí, kde je organická hmota zachována
- nízký přínos klastického materiálu do pánve s akumulací rašeliny

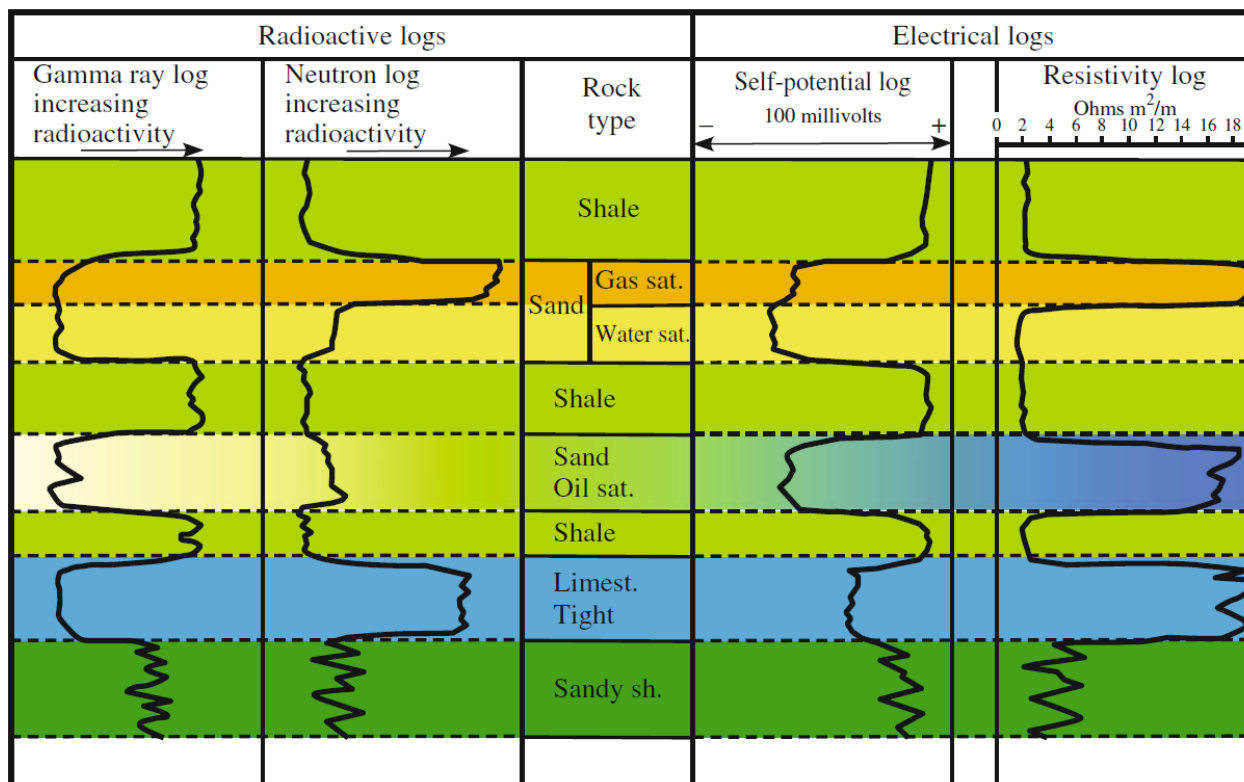
Karotáž

Karotáž slouží k získání fyzikálně petrografických parametrů navrtaných horninových vrstev. Podobně jako ostatní geologické metody prodělal dlouhý vývoj.

„Resistivity“ (odporová metoda): umožňuje zjištění především přítomnosti kapalin a plynu v pórech horniny. Vyšší odpor prostředí má zejména srážková voda, ropa, plyn, prouhelněné vrstvy a například karbonátové horniny.

SP (Spontaneous Self-potential Logs): měří elektrický potenciál mezi 3 elektrodami uvnitř vrtu a čtvrtou na ústí vrtu. Slouží k určení porozity horniny (břidlice vs. pískovec)

GR (Gamma ray log): určení rozdílů v parametrech hornin na základě přirozené radioaktivity. Přirozená radioaktivita je produkována v sedimentech především Th, U a K



Obrázek 31: Interpretace karotáže (Bjorlyke, 2010)

Kromě uvedených parametrů v tabulce nově karotáže dokážou měřit celou řadu dalších parametrů jako je například porozita, teplota, akustické parametry, hustota.

