

CVIČENÍ 1

JARO 2024

POKROČILÁ LOŽISKOVÁ
GEOLOGIE
LENKA SKŘÁPKOVÁ

PODMÍNKY ZÁPOČTU

1. **DOCHÁZKA** → max. 2 absence bez omluvy

2. **PRŮBĚŽNÉ TESTY**

- bez absence → nutné dopsat v náhradním termínu
- celkový počet bodů v každém testu je individuální → systém bodování <-2;-1;0;1;2>

3. **PRŮBĚŽNÝ TEST NA MINERÁLY**

- bez absence → nutné dopsat v náhradním termínu
- nepočítá se k ostatním průběžným testům → nutné jej splnit (možná oprava na konci semestru)

4. **ZÁPOČTOVÝ TEST**

- koná se **XXXXX** → před tímto datem je nutné mít splněné všechny výše uvedené podmínky
- součástí bude i praktické poznávání horninových vzorků
- k celkovému získanému počtu bodů se připočítají či odečtou body z průběžných testů
- bez jeho splnění není možné jít ke zkoušce

5. **KONZULTACE**

- vždy po předchozí domluvě

Genetická klasifikace

ložisek (upraveno podle Rozložník et al. 1987)

Série	Skupina	Typ	Formace	
Endogenní	magmatická	likvační	Cu-Ni + PGE	
		protomagmatická	Cr, PGE, C, Ti, REE	
		hysteromagmatická	Cr, Ti, magnetit-apatit	
	pegmatitová	jednoduché pegmatity	křemen-živec-slída	
		metasomatizované pegmatity	Li, Be, Nb-Ta, Sn, U-Th, Au, drahé kameny	
	karbonatitová		REE	
	hydrotermálních metasomatitů	skarnová	Fe, W, Cu, Pb-Zn, Co, Sn, Mo, U, ...	
		albititová	Nb-Ta, Zr, U, Be, ...	
		greisenová	Sn-W, Mo, Be, Li	
		porfyrových rud	Cu, Mo, U	
	hydrotermální	plutonická	Au, Sn, W, Mo, Cu, U, Ni-Co, Sb, ...	
		subvulkanická	Sn-W-Bi-Ag, Au-Ag, Cu-Pb-Zn, ...	
		teletermální	Pb-Zn, Hg-Sb, Cu, fluorit	
	Metamorfogenní	kontaktně metamorfogenní	kontaktně metamorfovaná	Fe, Mn, V, ...
			kontaktně metamorfní: metasomatická termometamorfní	viz skarny grafit, smírek, andalusit
regionálně metamorfogenní		regionálně metamorfovaná	Fe, Mn, kyzové formace, rýžoviska	
		regionálně metamorfní: restity pegmatity metasomatity metamorfně	grafit, sillimanit, azbest křemen-živec-slída viz skarny viz hydrotermální	

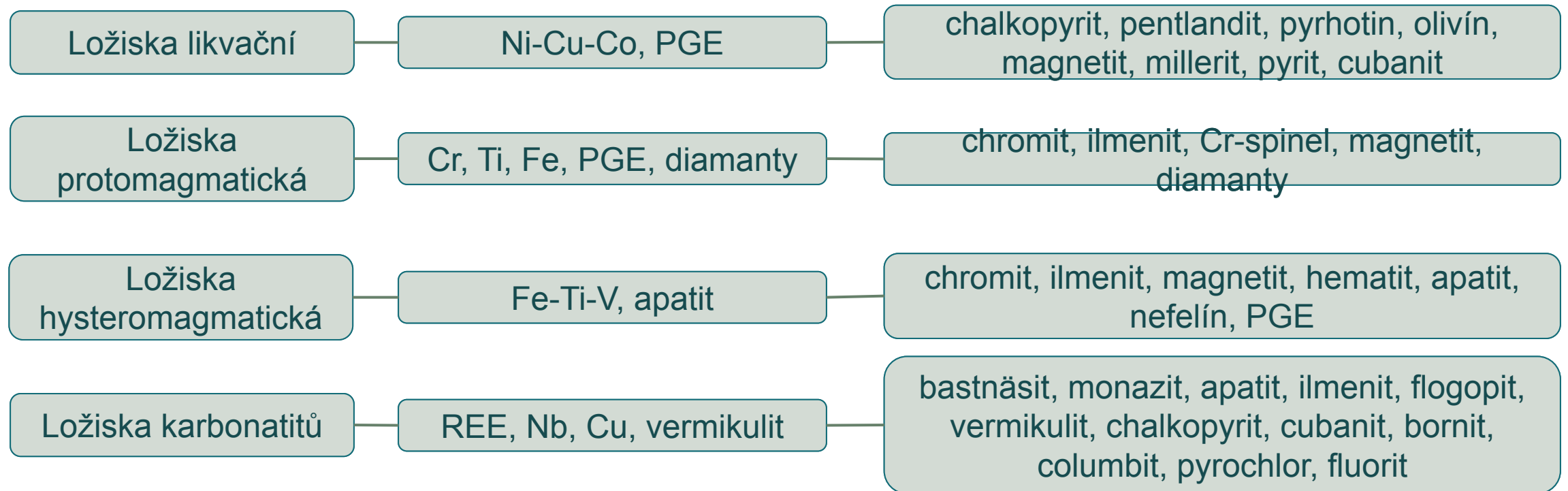
Endo-exogenní	subaerická	vulkanoexhalační	S, B
		krustální	travertin, sintry
		hydratogenní	pitná, léčivá, průmyslová voda geotermální energie
	submarinní	vulkanosedimentární	Fe (Lahn Dill), Mn, Cu+Pb-Zn+Au-Ag (kyzové formace)
hydrotermálně sedimentární		Cu-Co, Cu, Pb-Zn + Ag, kovanosné jíly	
Exo-endogenní	infiltrační	mineralizace hydrogenní: v pískovcích v karbonátech v kaustobiolitech	U, Cu red beds S, sádrovec, P U, Ge, P
Exogenní	zvětralinová	rýžoviska	Sn, Nb-Ta, W, diamant, pyrop
		reziduální	kaolin, bauxit, Fe, Ni-laterity, ...
		halmyrolytická	bentonit
		supergenního obohacení	druhotné oxidické a sulfidické rudy
	sedimentární	klastická	Au, Pt, diamant, Sn, Ti, Zr, Au-U, šterky, písky
		chemogenní a biochemogenní	evapority, karbonáty, silicity
organogenní		karbonáty, silicity, fosfority kaustobiolity	



MAGMATICKÁ LOŽISKA

Procesy diferenciacie a krystalizace magmatu

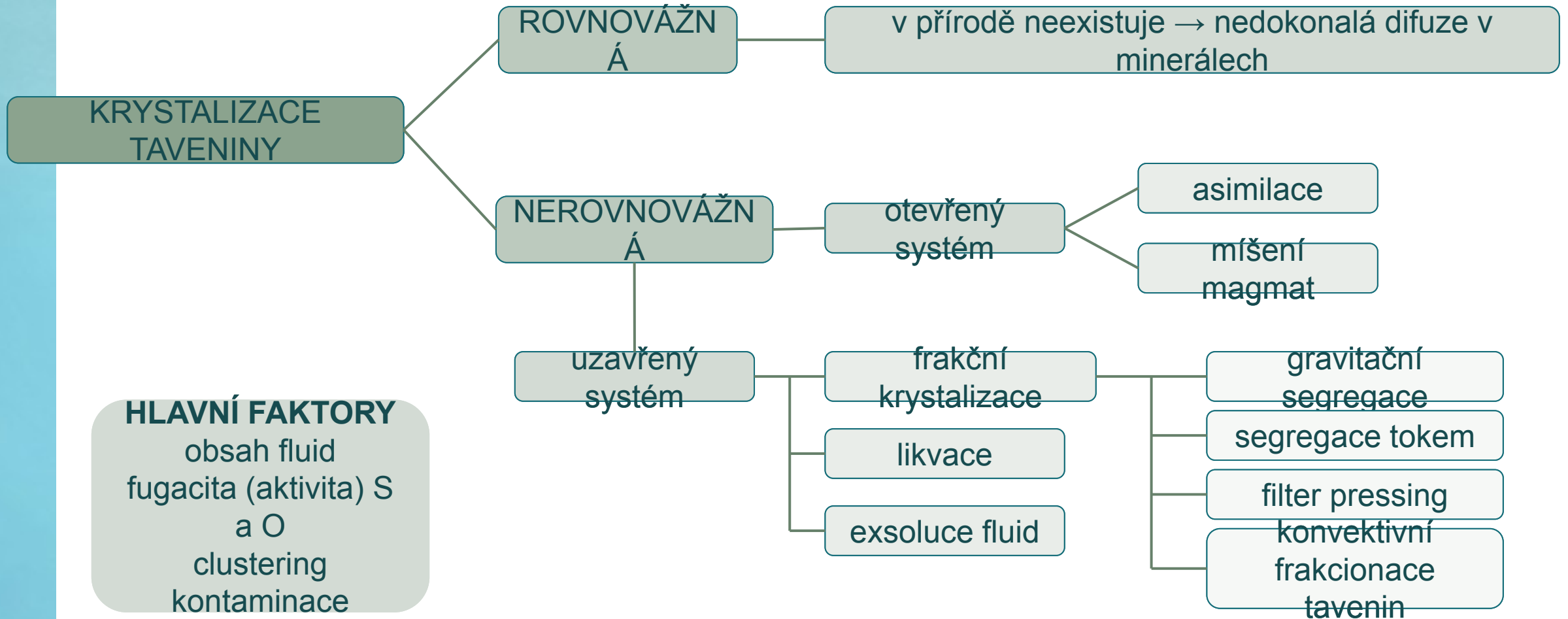
MAGMATICKÁ LOŽISKA - PŘEHLED



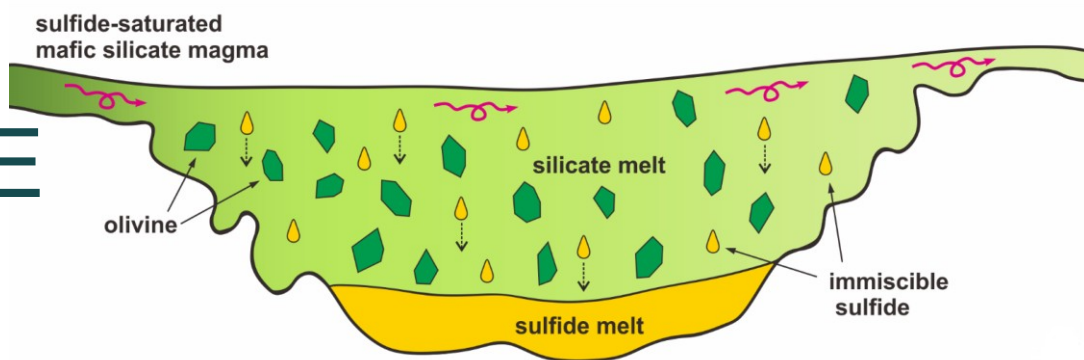


LIKVAČNÍ LOŽISKA

DIFERENCIACE MAGMATU



LIKVACE



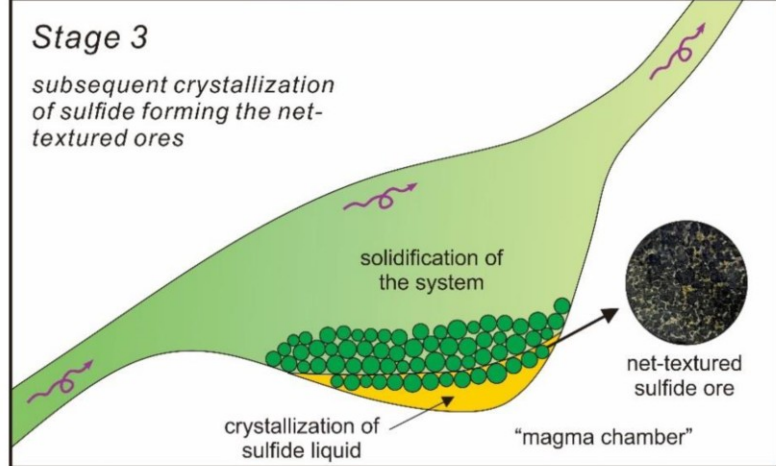
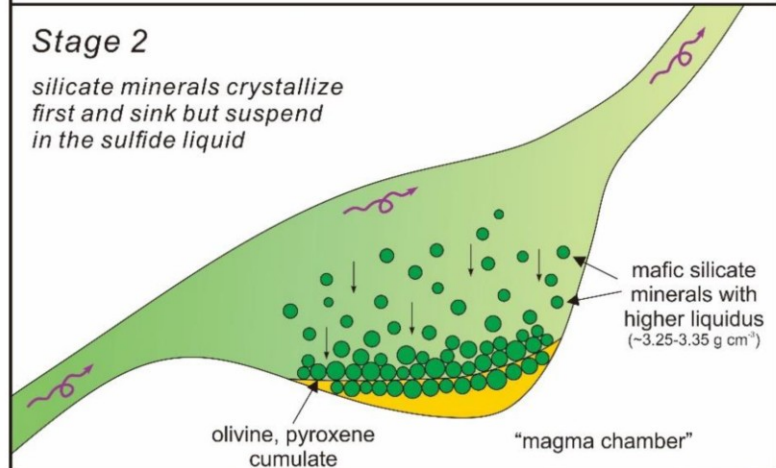
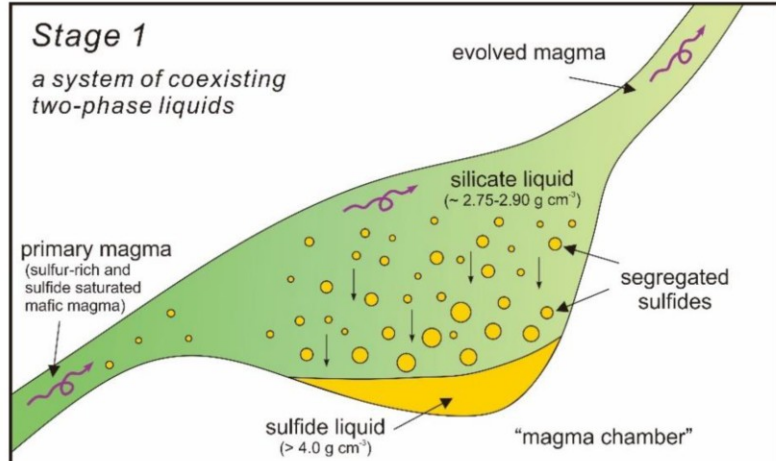
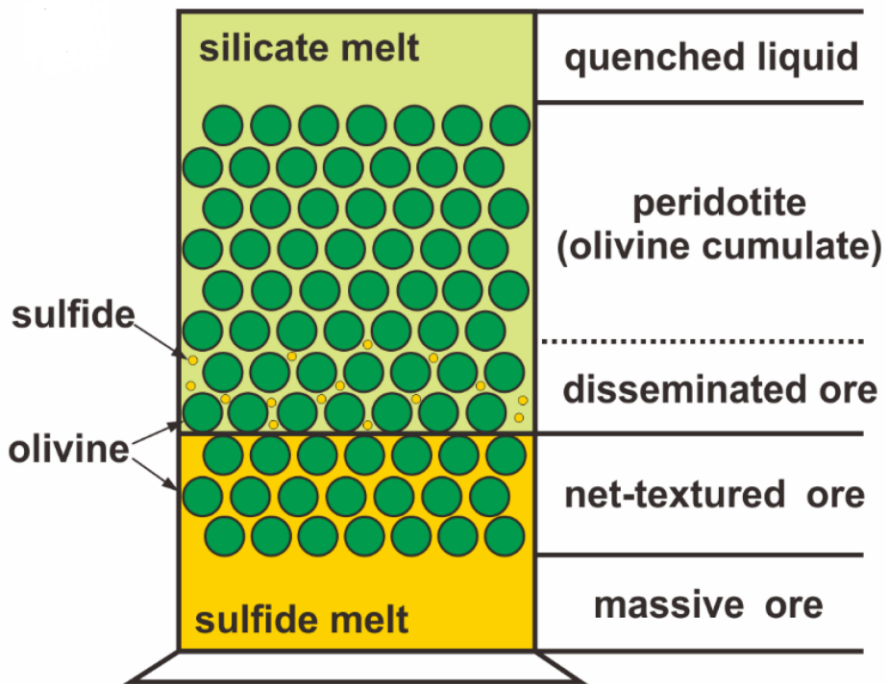
Proces oddělení silikátové a sulfidické taveniny při cca 1500 C.

Sulfidická tavenina se začne shlukovat a vzhledem ke své vyšší hustotě, klesá do spodních částí magmatického tělesa, kde začíná tuhnout v teplotním rozmezí 200-600 C.

ložiska Ni-Cu-Co, PGE

pyrhotin, pentlandit, chalkopyrit, millerit, PGE-minerály, olivín, magnetit

masivní, vtroušeninové a brekciovité textury



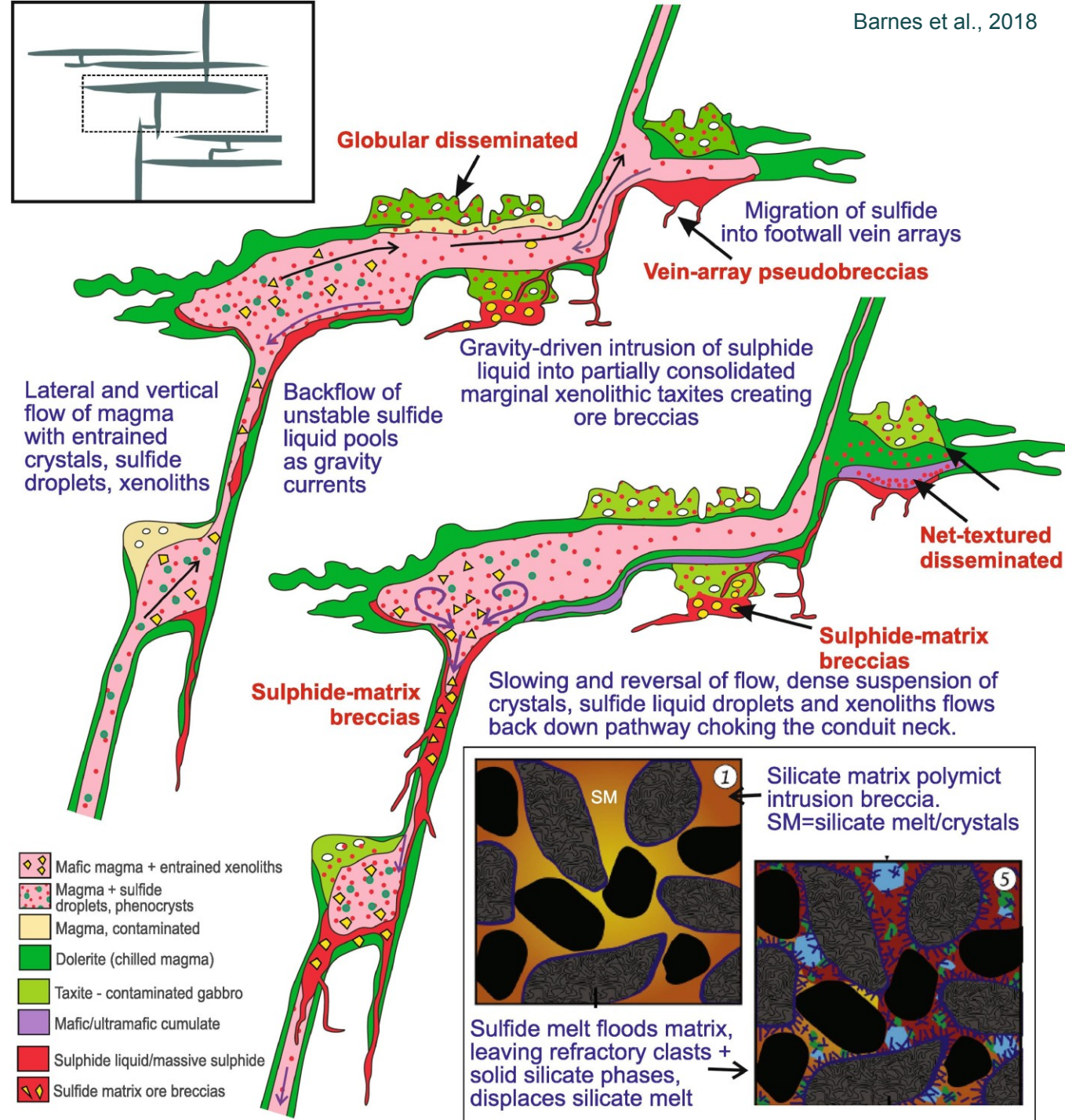
LIKVACE

Procesy likvace nejsou vždy vázány jen na jednu intruzi – mohou probíhat i v rámci soustavy více intruzí.

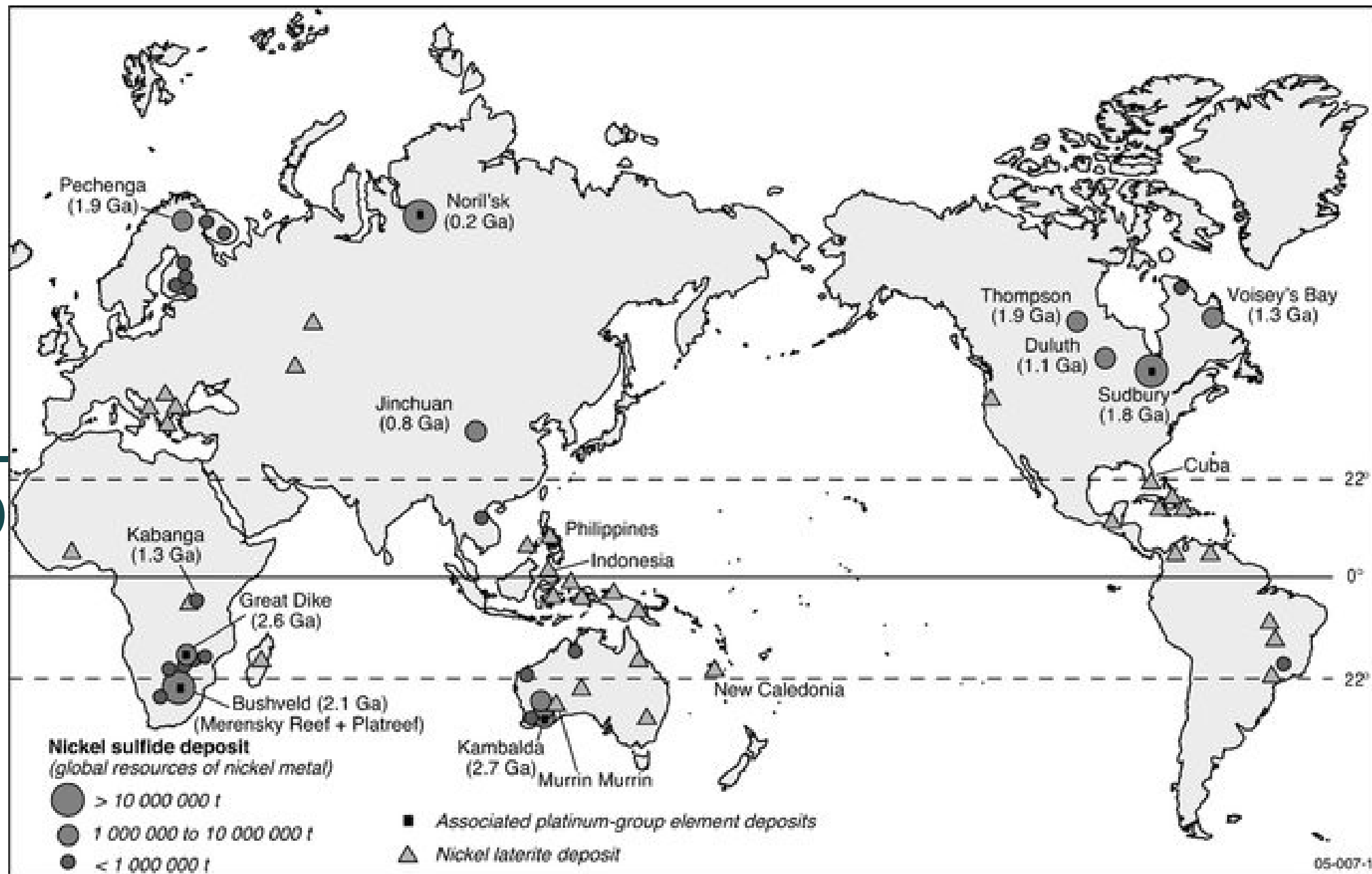
Pohyb taveniny tak není vázán jen směrem vzhůru, ale i do stran a může docházet i ke zpětnému toku.

Vícefázový pohyb taveninu současně s likvací také diferencuje dalšími způsoby.

Dochází ke vzniku textur odrážejících různé způsoby průchodu taveniny a polyfázový vývoj.



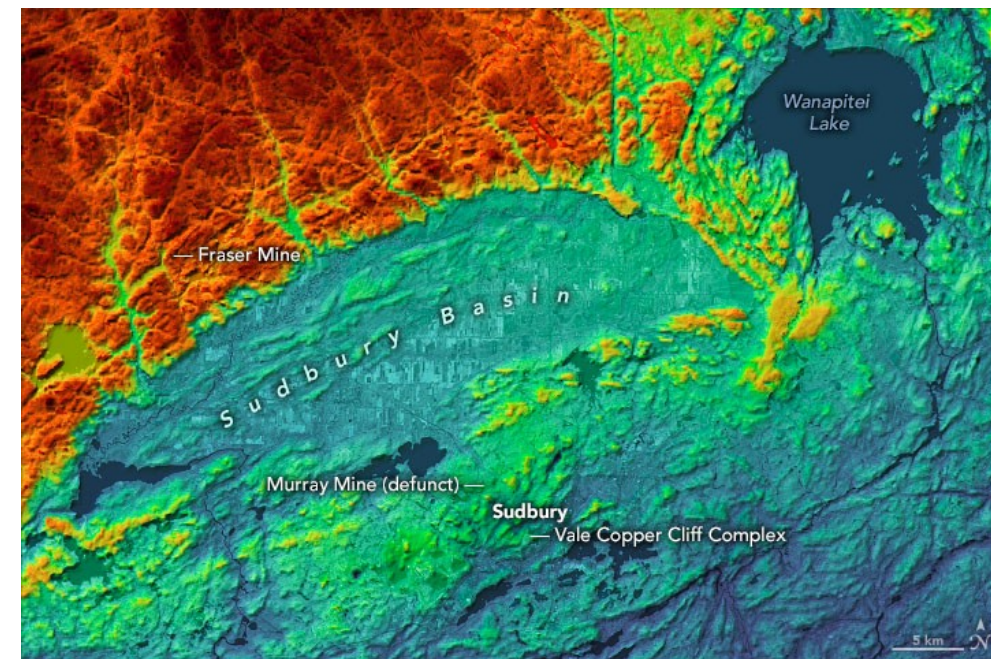
LIKVAČNÍ LOŽISKA - PŘEHLED



SUDBURY

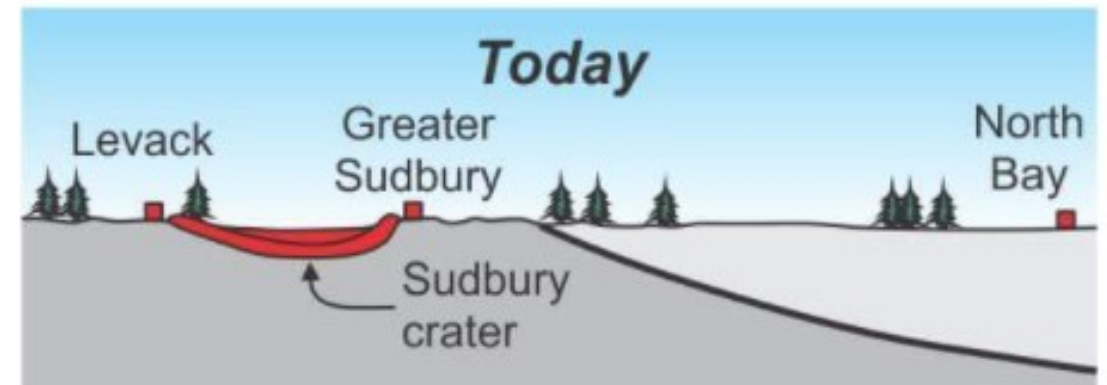
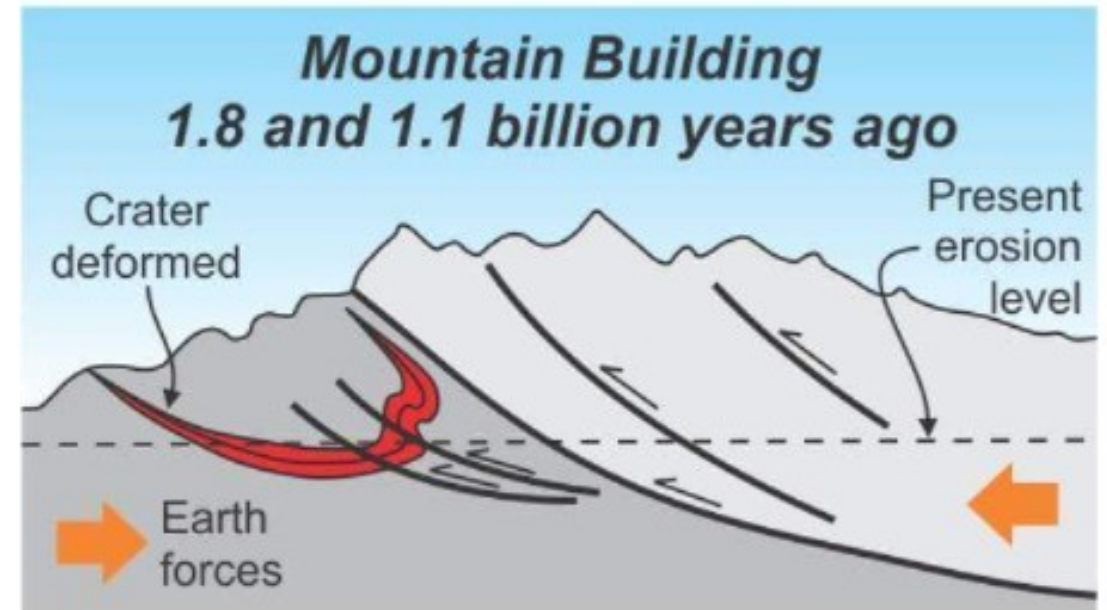
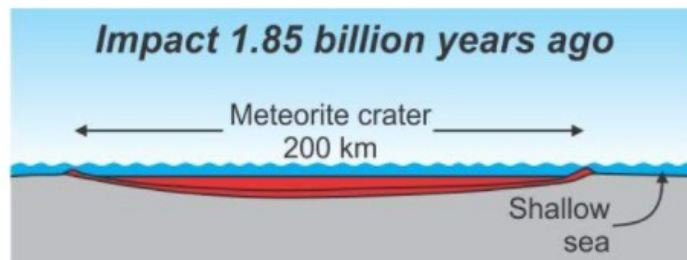
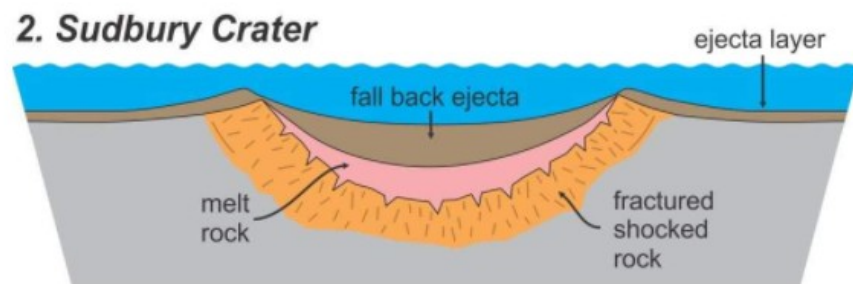
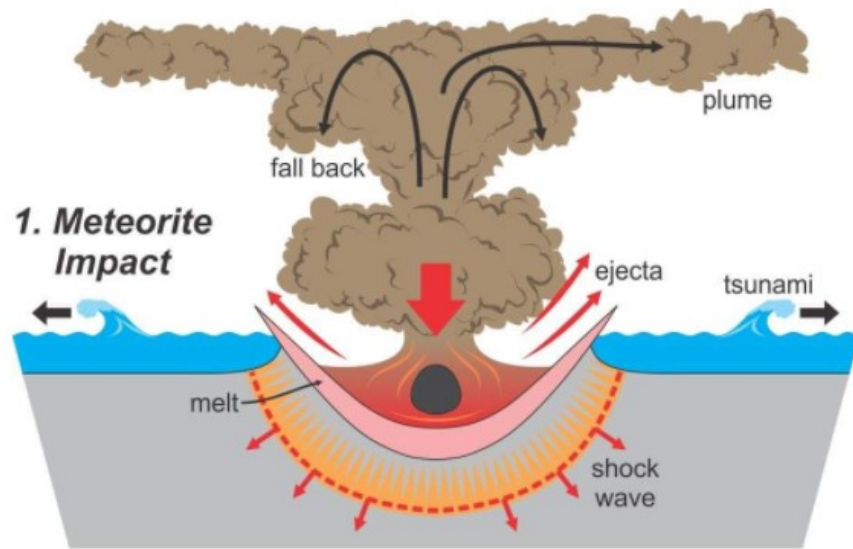
Ni-Cu, PGE,
Co

- **největší světové ložisko Ni**
- vrstevnatá mafická intruze vzniklá dopadem meteoritu před 1.85 Ga
- průměrný obsah Ni 1.2 hm. % a Cu 1.03 hm. %
- **chalkopyrit, pyrhotin, pentlandit**
- mineralizace vázána na nority, křemenná gabra a brekcie



Elevation (m)
175 275 375 475

SUDBURY – VZNIK LOŽISKA



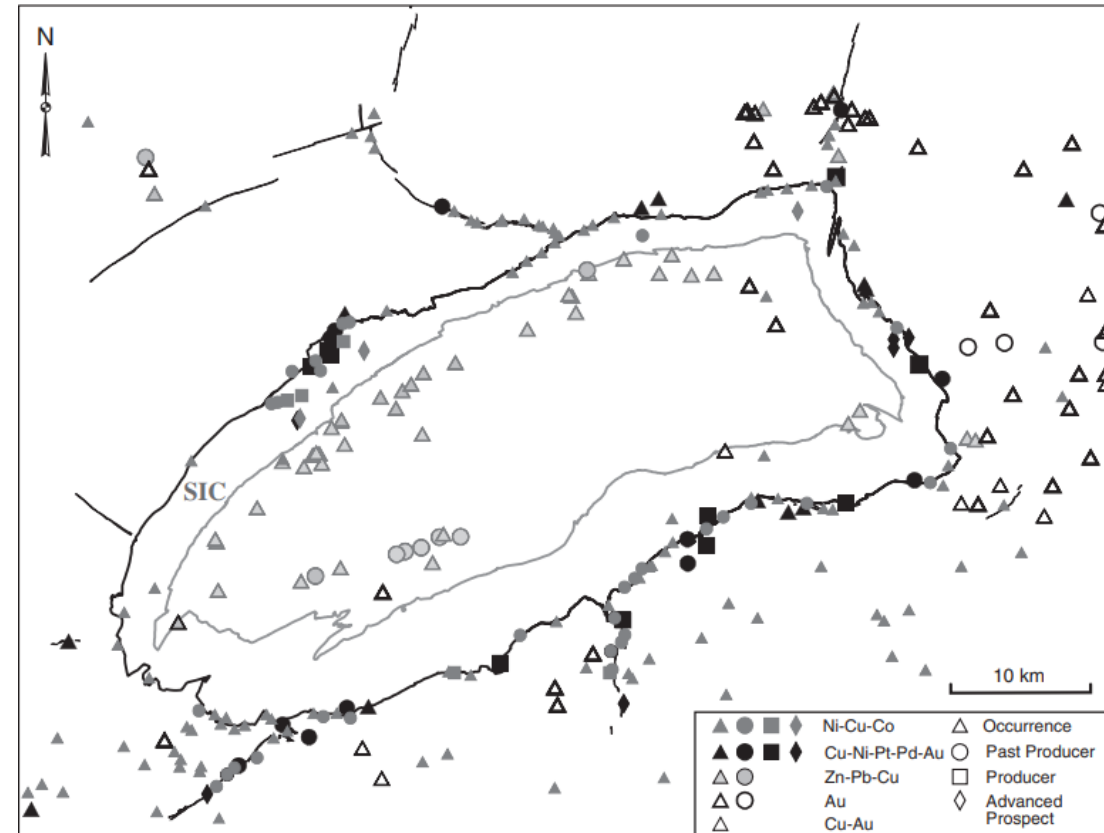
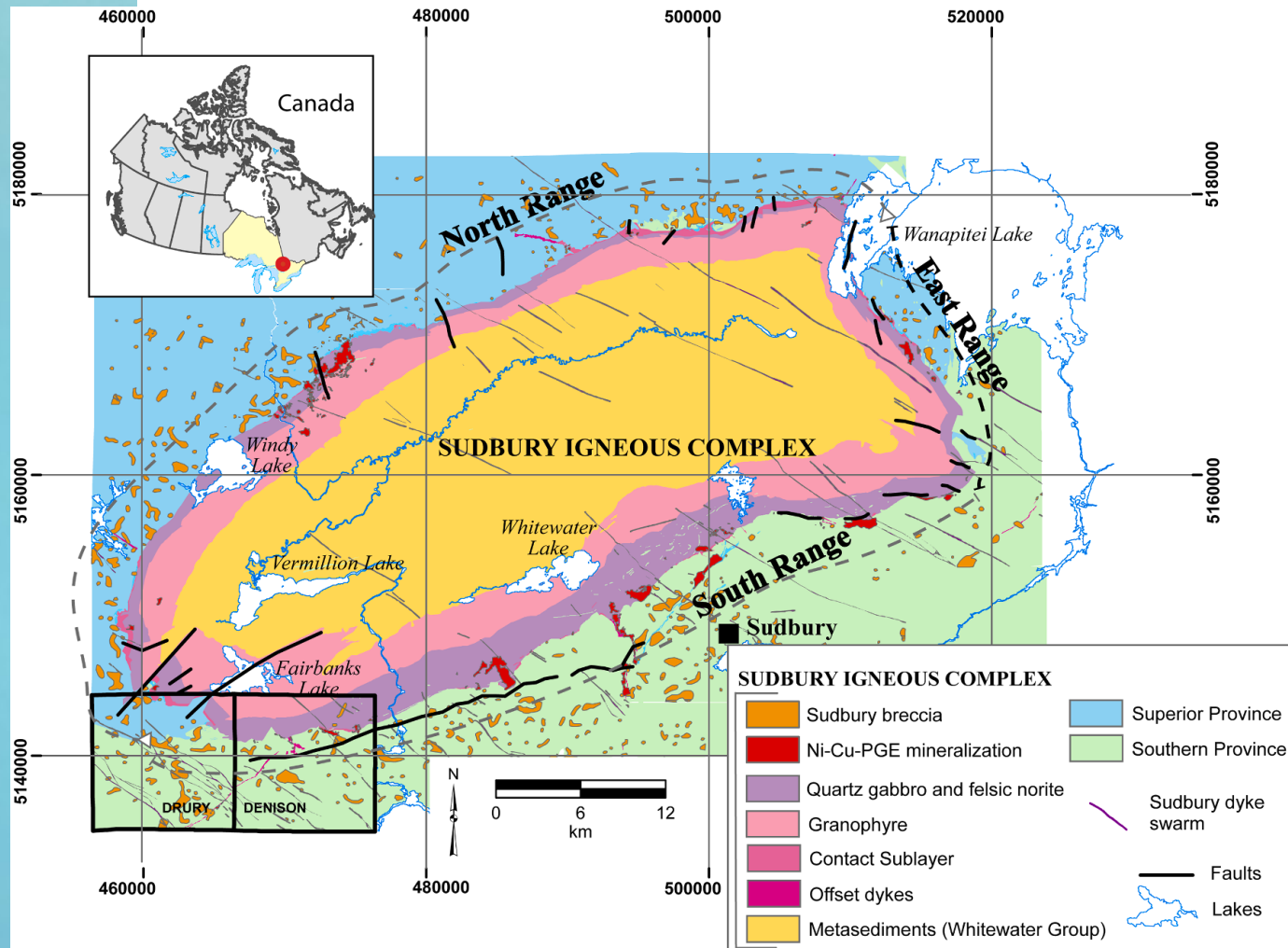
SUDBURY – KOMPLEX

IMPAKTNÍ STRUKTURA MÁ 3 HLAVNÍ ČÁSTI

Sudbury basin

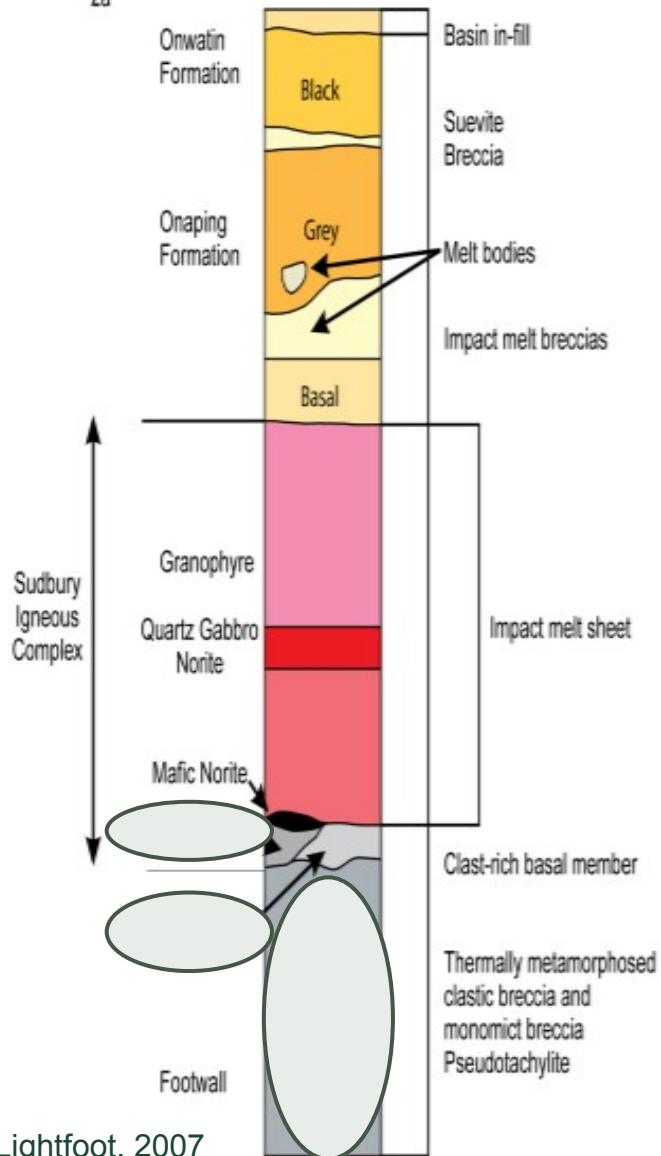
SIC (Sudbury Igneous complex)

šokově met. podložní horniny (shatter-coned)



SUDBURY – STRATIGRAFIE ALIZACE

2a



**MAIN MASS
ROCK**

3 HLAVNÍ VRSTVY

svrchní	granofyr
střední	křemenné gabro
š	

MINERALIZACE

- contact sublayer
- footwall breccia
- Qz-diorite offset dikes

CONTACT SUBLAYER

Fe-Ni-Co mineralizace vázána na magmatickou brekciu v bazálních noritových vrstvách ložiska.

Vtroušeninová až brekciovitá textura.

FOOTWALL BRECCIA

Cu-PGE-Ni mineralizace vázána na brekciované podložní jednotky ložiska Sudbury.

Vysoké obsahy Pt+Pd+Au.

Masivní textura.

OFFSET DYKES

Cu-Ni-PGE mineralizace vázána na křemenný diorit

Vtroušeninová až masivní textura.

SUDBURY – MINERALIZACE



footwall breccia – masivní
chalkopyrit

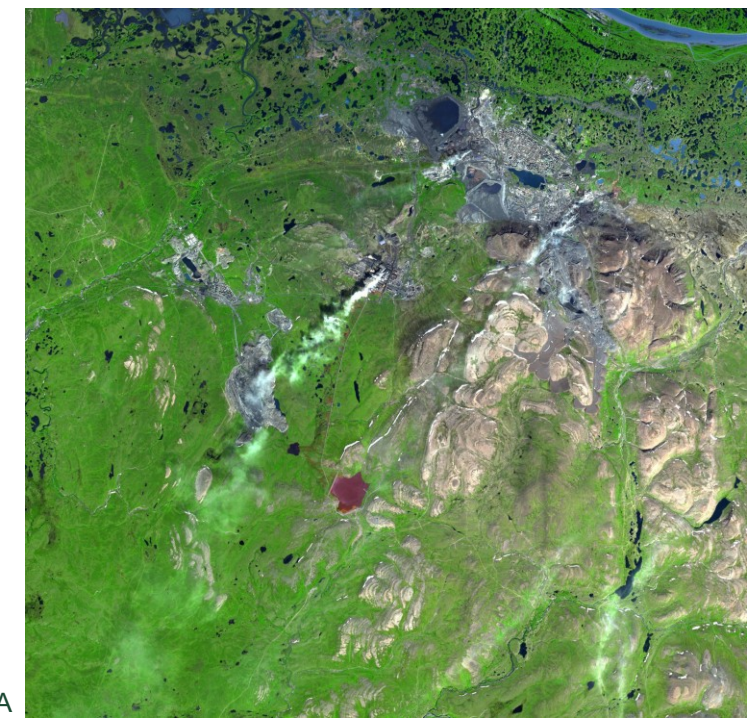


footwall breccia – žilky masivního
pyrhotinu a chalkopyritu

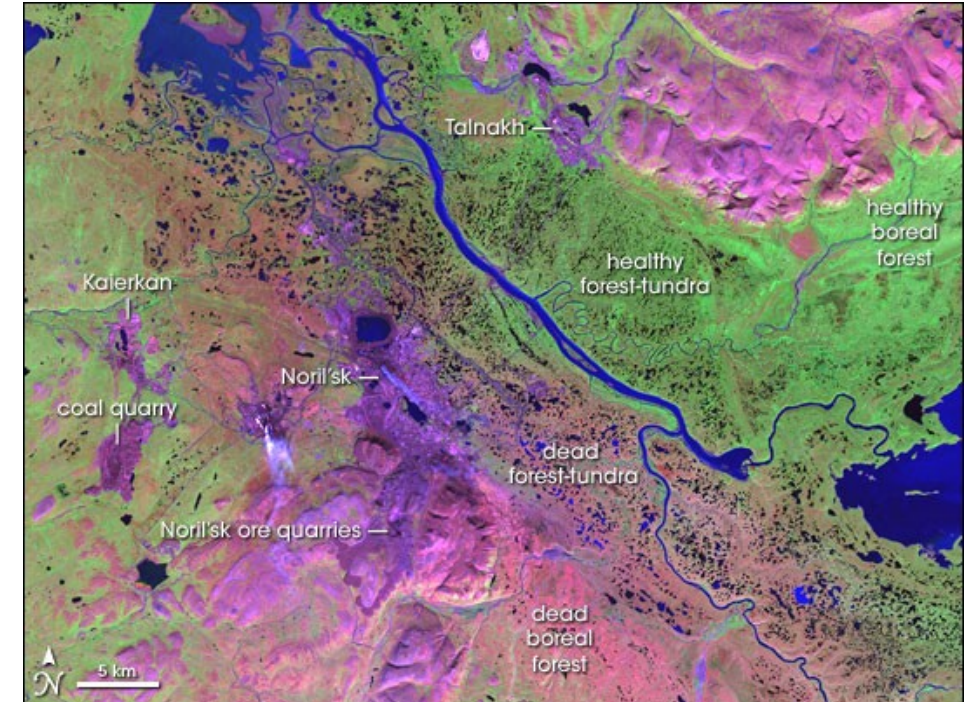
NORIL SK

Ni, Pd-Cu,
PGE

- olivín-nosné diferenciované ultramafické intruze (**gabro-dolerit**) perm-triasového stáří, uložené v sedimentech na SZ okraji sibiřského kratonu
- obsah Ni 0.5-2.8 hm. % a 0.6-5 hm. Cu
- PGE až 15 g/t
- Co, Pd, Rh, Au, Te, Se, Ag a S
- **chalkopyrit, pentlandit, millerit, pyrhotin**
- mineralizace vtroušeninová, masivní a tzv. Cu-sulfidová

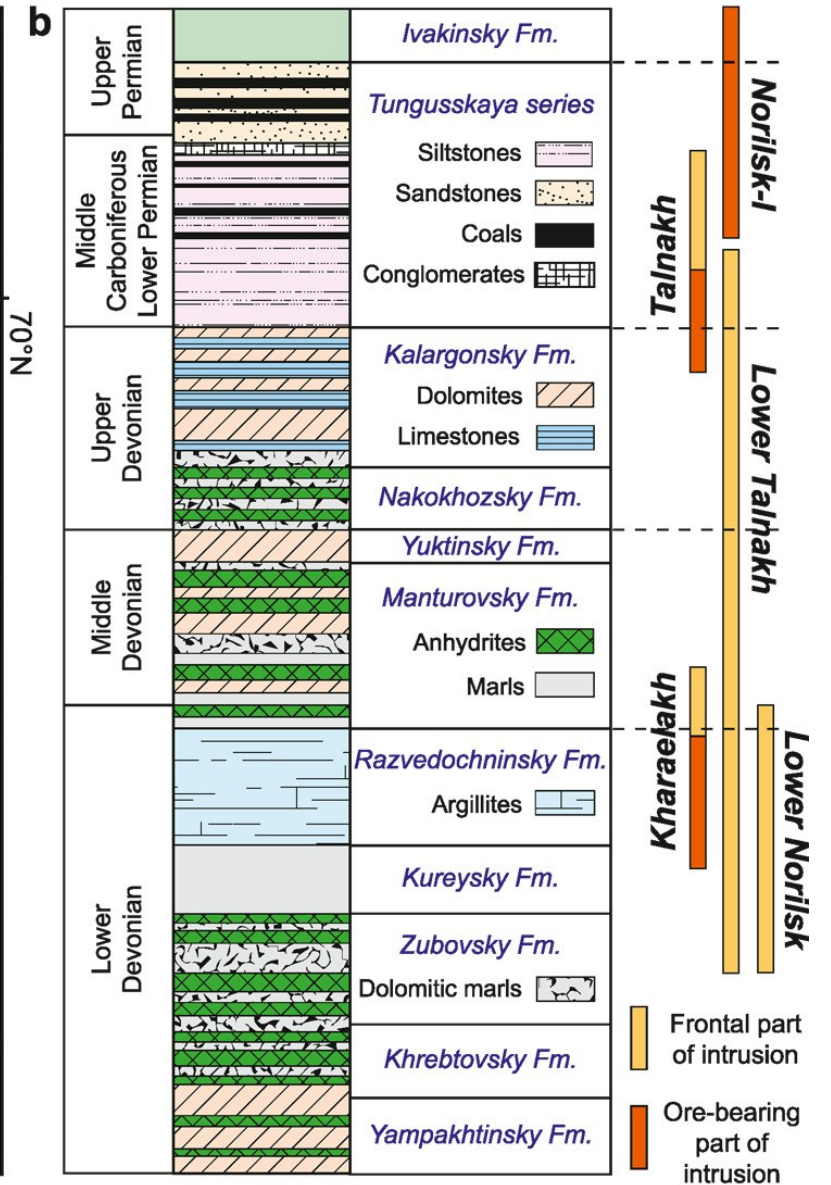
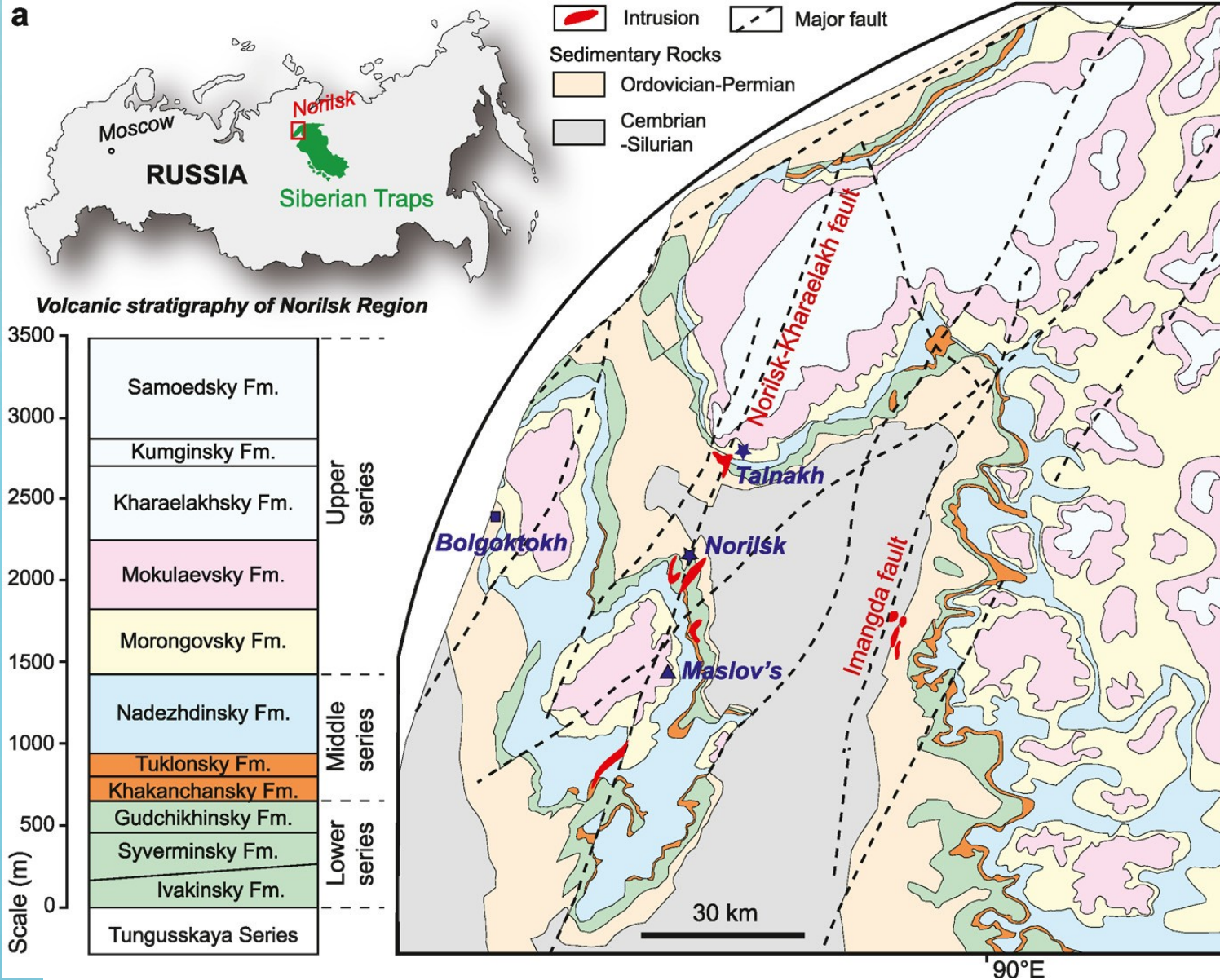


NASA



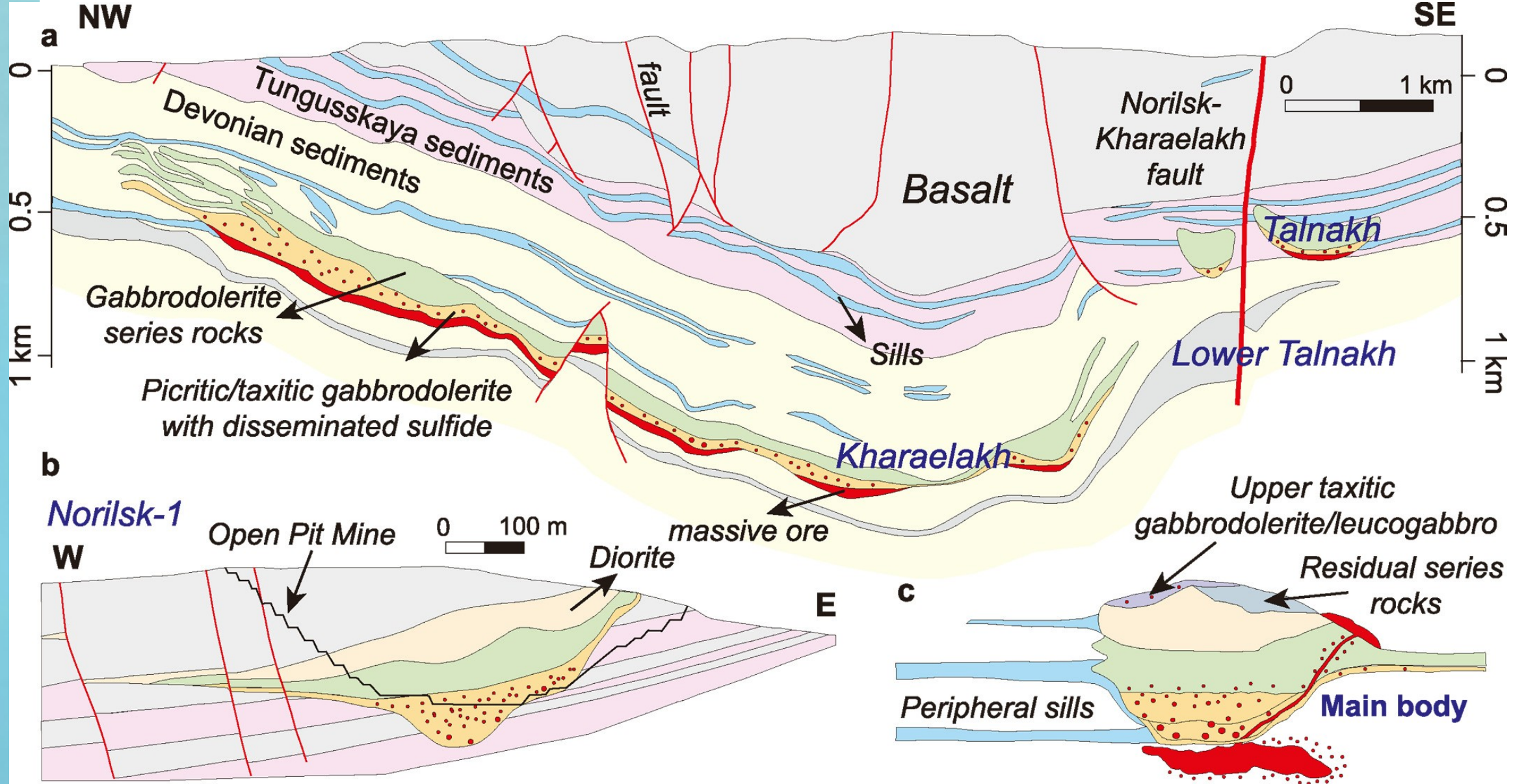
NORIL SK – STRATIGRAFIE

Yao & Mungall, 2021



NORIL SK – ŘEZ LOŽISKY

Yao & Mungall, 2021



NORIL SK - MINERALIZACE

VTROUŠENINOVÁ RUDA

0.5-0.6% Ni, 0.6-0.7% Cu, 5-6 g/t PGEc

Vázána na olivín-nosné
horniny.

Chalkopyrit, pyrhotin,

MASIVNÍ ČOČKY

2.8% Ni, 5.6% Cu, 15 g/t PGE

Vnitřně zonální: střed tvořený
Cu-sulfidy je lemovaný
pentlanditem, pyrhotinem a
magnetitem.

Cu-SULFIDY

Tvoří nepravidelná rudní tělesa
brekciovité struktury. Samotná
Cu- ruda je vrstevnatá.

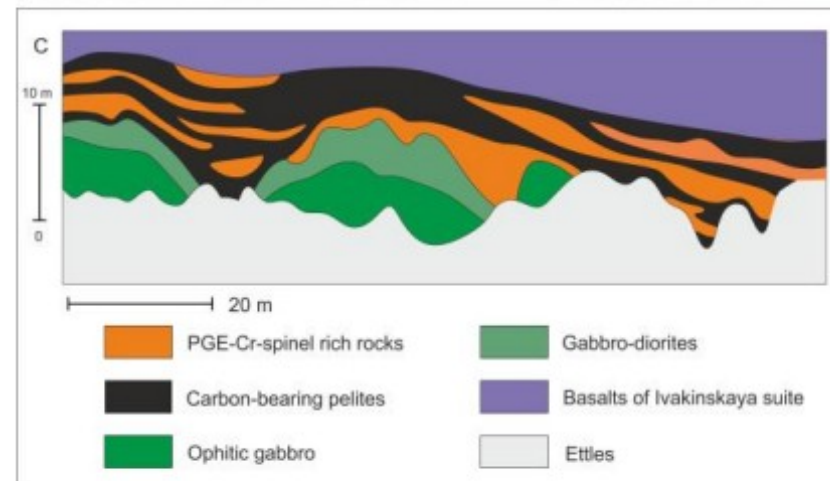
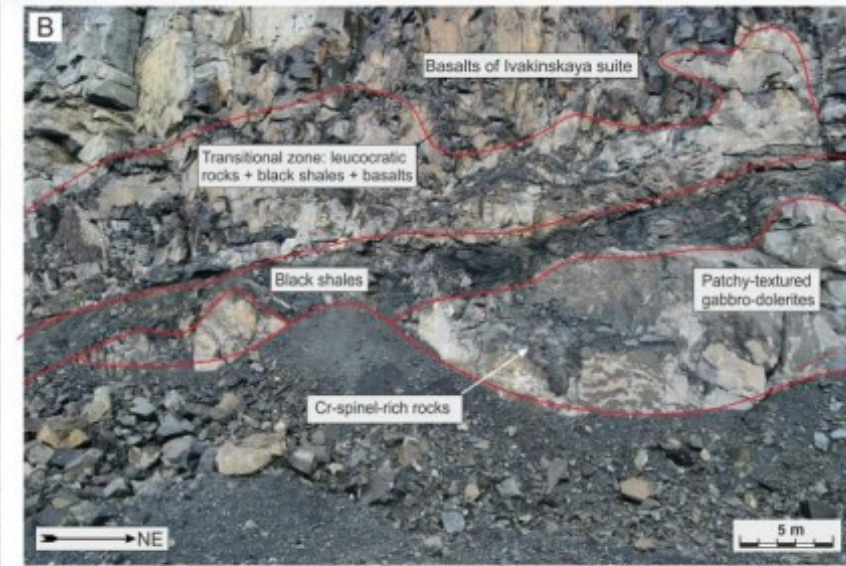


Figure 2. Field relationships of different rocks in the Medvezhy Ruchey open pit. (A) Layout of the open pit with outlined main geological bodies; (B) sampled outcrop on the 300 m horizon; (C) a geological sketch of the 270 m horizon (after [13]); (D) Leucogabbro with visible Cr-spinel-rich sites.

NORIL SK - MINERALIZACE

Yakubchuk & Nikishin,
2002



80 cm mocná masivní čočka sulfidů uložená v kontaktním rohovci, Komsomolsky důl, intruze Talnakh



kontakt diferencované intruze (nahore) a vápence (dole) se sulfidickými čočkami podél jejich kontaktu, Komsomolsky důl, intruze Talnakh



NORIL SK - ZNEČIŠTĚNÍ



Norilsk Leads the World in Sulfur Dioxide Pollution

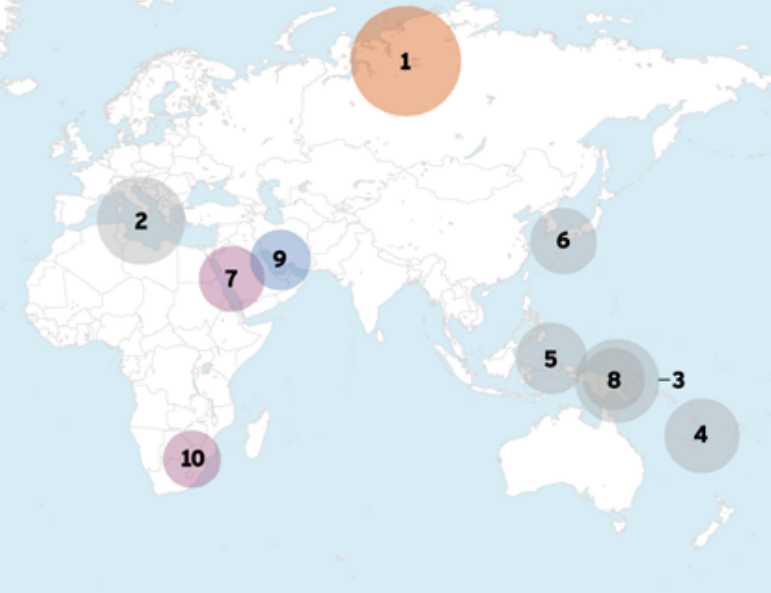
The Norilsk Nickel smelting complex in Siberia generates close to 2 million tons of sulfur dioxide pollution annually, far more than any other human enterprise on Earth. Only volcano emissions come close, according to a NASA-led global monitoring project. The company this year launched a project it says will reduce sulfur pollution 90 percent by 2025.

TOP 10 SULFUR DIOXIDE EMITTERS

In kilotons, 2019

● Volcano ● Smelter ● Oil & gas ● Power plant

LOCATION	EMISSIONS
1 Norilsk, Russia	1,833 kt
2 Mt. Etna, Italy	1,161 kt
3 Manam, Papua New Guinea	1,070 kt
4 Yasur, Vanuatu	844 kt
5 Dukono, Indonesia	763 kt
6 Aso, Japan	664 kt
7 Rabigh, Saudi Arabia	652 kt
8 Kadovar, Papua New Guinea	592 kt
9 Zagros, Iran	558 kt
10 Kriel, South Africa	504 kt



KAMBALDA

Ni-Cu, PGE

- mineralizace Ni-Fe vázána při bázi mafických-ultramafických hornin (komatiity) v archaických greenstone belts
- poloha **Silver Lake Komatiite** → všechna ložiska Ni
- dnes všechny horniny různou mírou metamorfovány, hydratovány a karbonatizovány (ultramafické horniny → jílovo-karbonátové a serpentinizované formace)
- niklo-nosné rudy mohou být asociovány také se zlatonosnými hydrotermálními křemen-karbonátovými žilami
- 1–5 hm. % Ni (výj. až 20 hm. %)
- masivní a vtroušeninové textury
- pyrrhotin, pentlandit, pyrit, chalkopyrit, magnetit, spinel a chromit

SPINIFEX TEXTURA

- = skeletální, tabulkovitě až jehlicovitě krystaly olivínu či pyroxenu v ultramafických-mafických lávách
- synonymem je herinkovitá či pérovitá textura
- **interspinifex ore** = olivín se spinifexovou texturou asociovaný se sulfidy, typicky na sulfidových ložiscích vázaných na komatiity



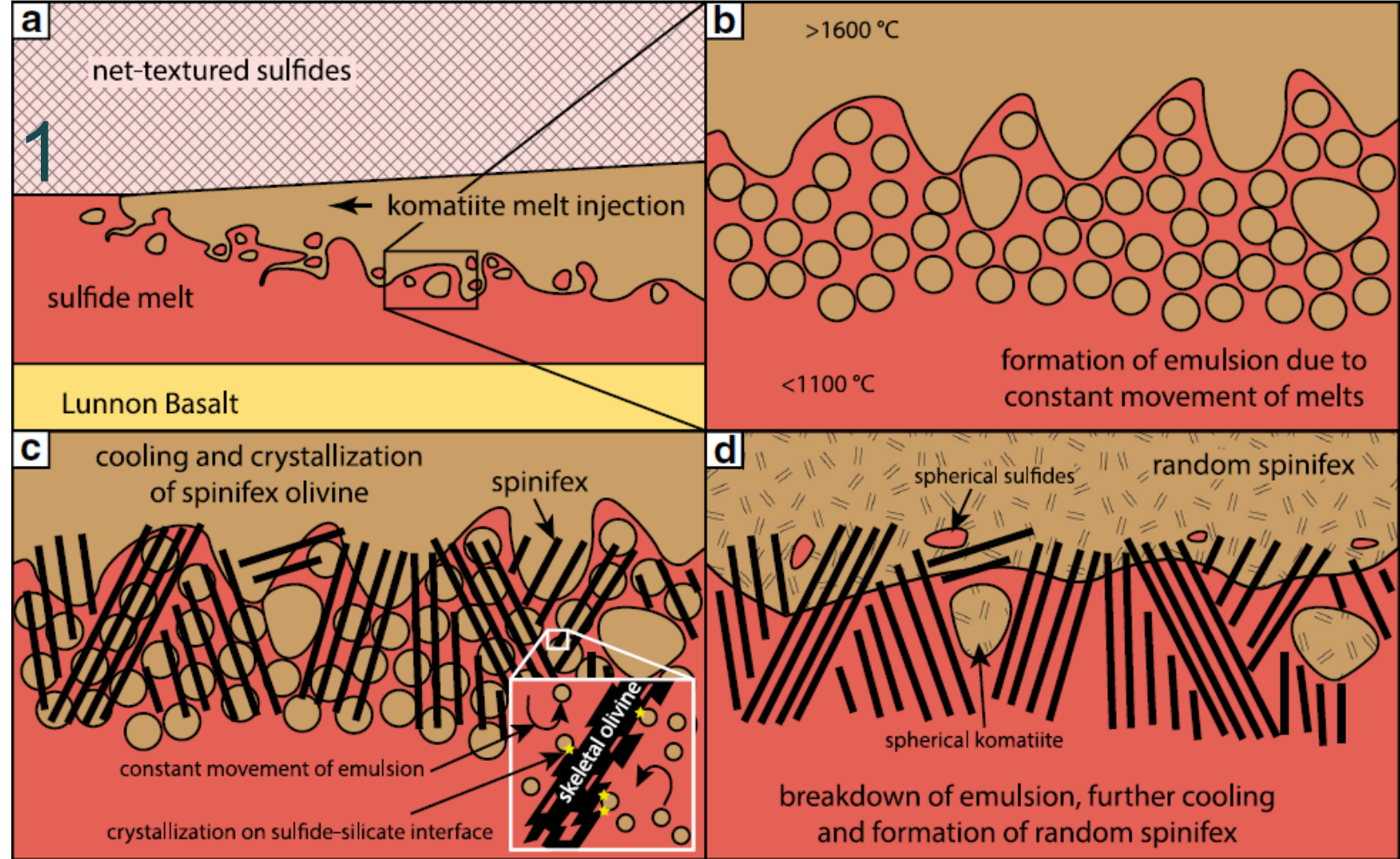
MODEL VZNIKU 1

Komatiitová tavenina laterálně injektovala do sulfidické taveniny a vytvořila tak bariéru mezi stále ještě tekutými masivními sulfidy a již ztuhlými net-textured sulfidy.

Interakce a vzájemná asimilace → spinifex textury, sférické agregáty komatiitu v sulfidech a naopak, emulzní struktury (nemísitelnost tavenin).

Spinifex textura olivínu vznikla díky výrazně vyšší teplotě komatiitové taveniny (>1500 °C) injektované do zchlazené sulfidické taveniny (ca. 1190 °C) a drobným pohybům komatiitových sférických agregátů.

Krystalizace spinifex olivínu výrazně zpomalila vzájemnou interakci tavenin, až došlo k jejich oddělení.



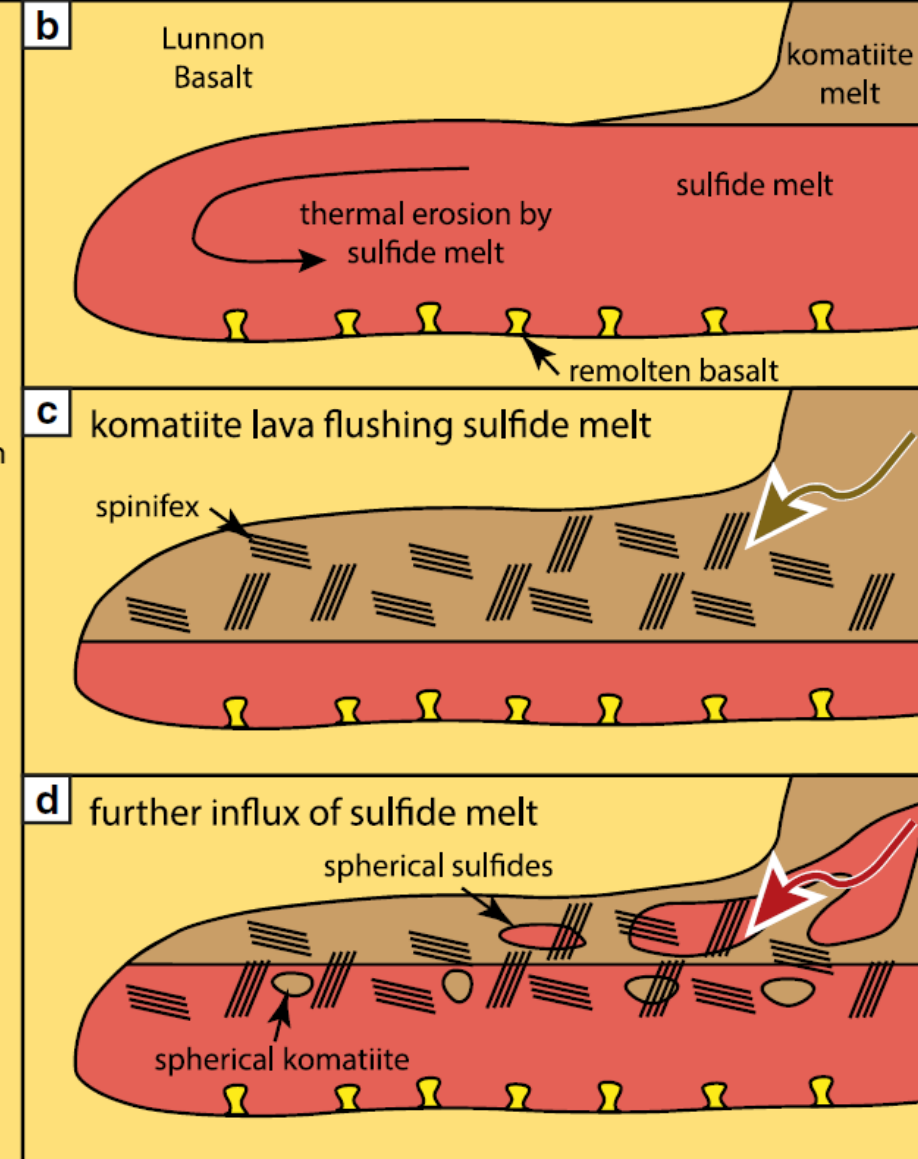
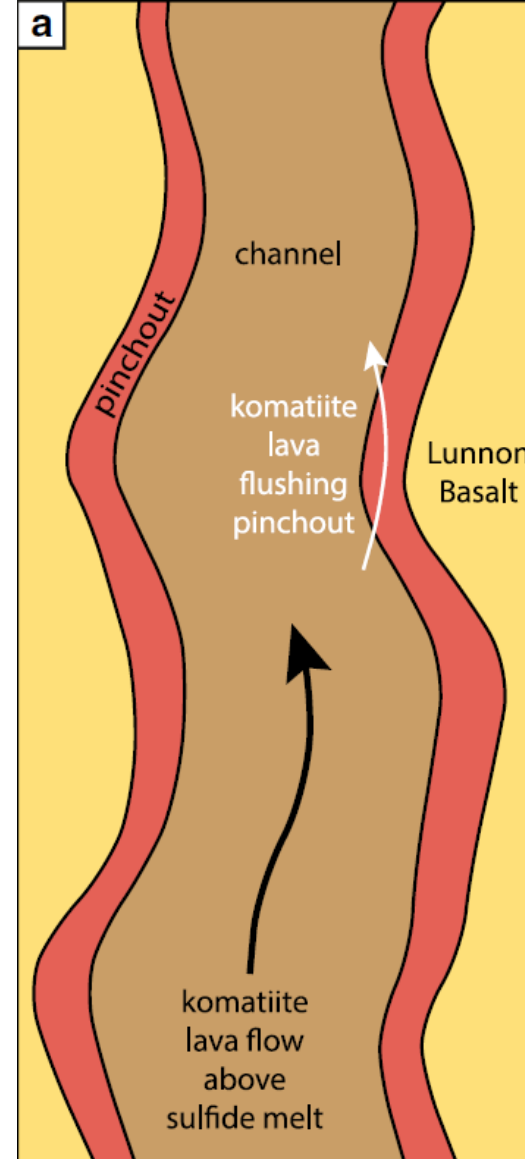
MODEL VZNIKU 2

Model založený na několika pulzech komatiitové a sulfidické taveniny.

Vyklínění (pinchout) vzniklo laterální termální erozí způsobené sulfidickou taveninou.

Postupně došlo k „vymílání a erozi“ sulfidické taveniny stále aktivní komatiitovou taveninou za vzniku polohy komatiitu se spinifex texturou.

Nový pulz sulfidické taveniny injektoval do zřejmě stále částečně tekuté komatiitové taveniny a generoval další spinifex rudu.



Následoval další pulz komatiitové taveniny a alterace/eroze starší sulfidické taveniny.

MODEL 1

Vysvětluje pozorované textury, stratigrafii a vyklínění.

Vysvětluje vysoké množství magnetitu v asociaci s interspinifexturou a vysoké hodnoty Ni, S, Pd a Pt v komatiitu → interakce komatiitu a sulfidů.

Vyžaduje injektáž relativně lehké komatiitové taveniny v podobě ložní žíly do hustší, stále částečně tekuté sulfidické taveniny → strukturní bariéra (zlomy, praskliny, atd.)

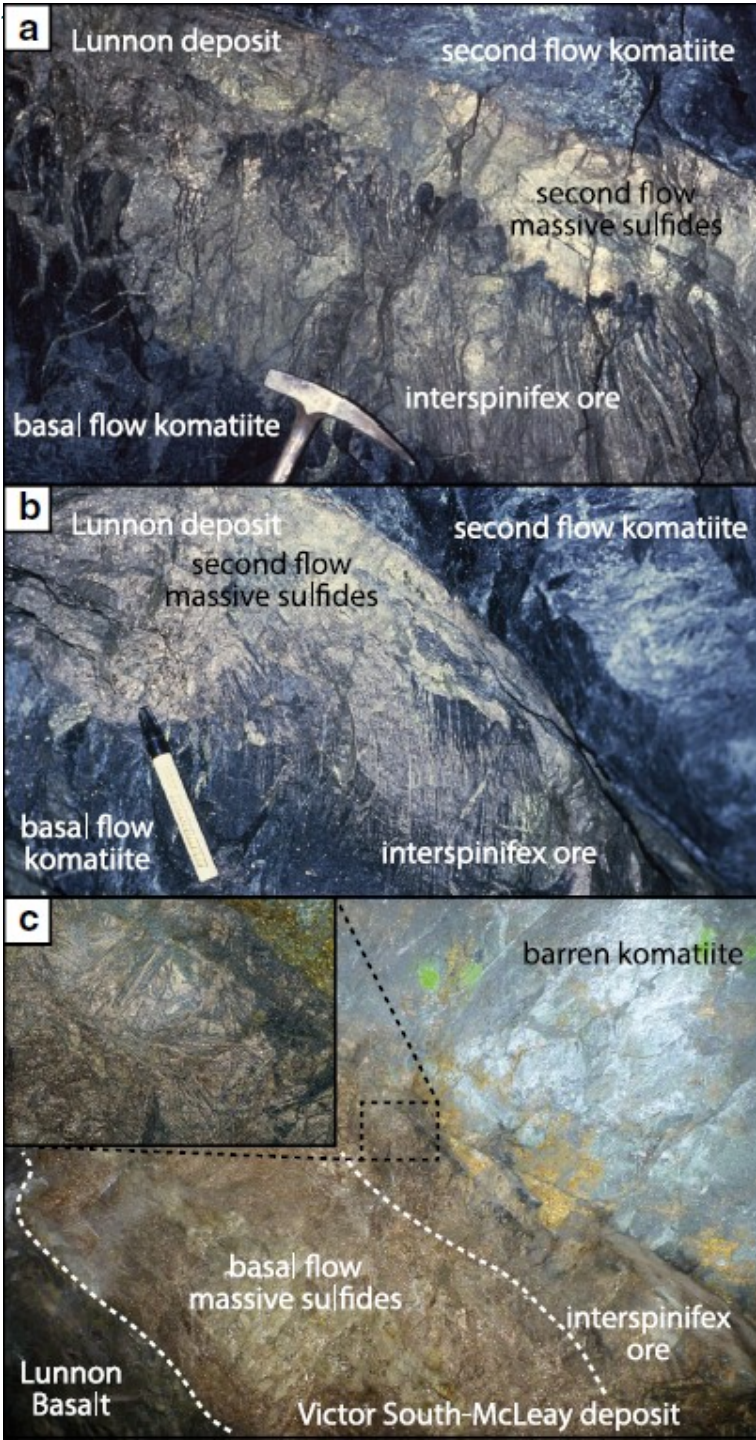
Vtroušený chromit by měl být hojný vzhledem k výraznému promísení sulfidické a komatiitové taveniny. Chybějící chromit by musel být fyzicky přemístěn jinam → vysvětluje pozorované chromitové dutiny.

MODEL 2

Vysvětluje geometrii vyklínění, ale vyžaduje složitější procesy.

Vyžaduje vznik pouze netextured sulfidů bez masivních sulfidů.

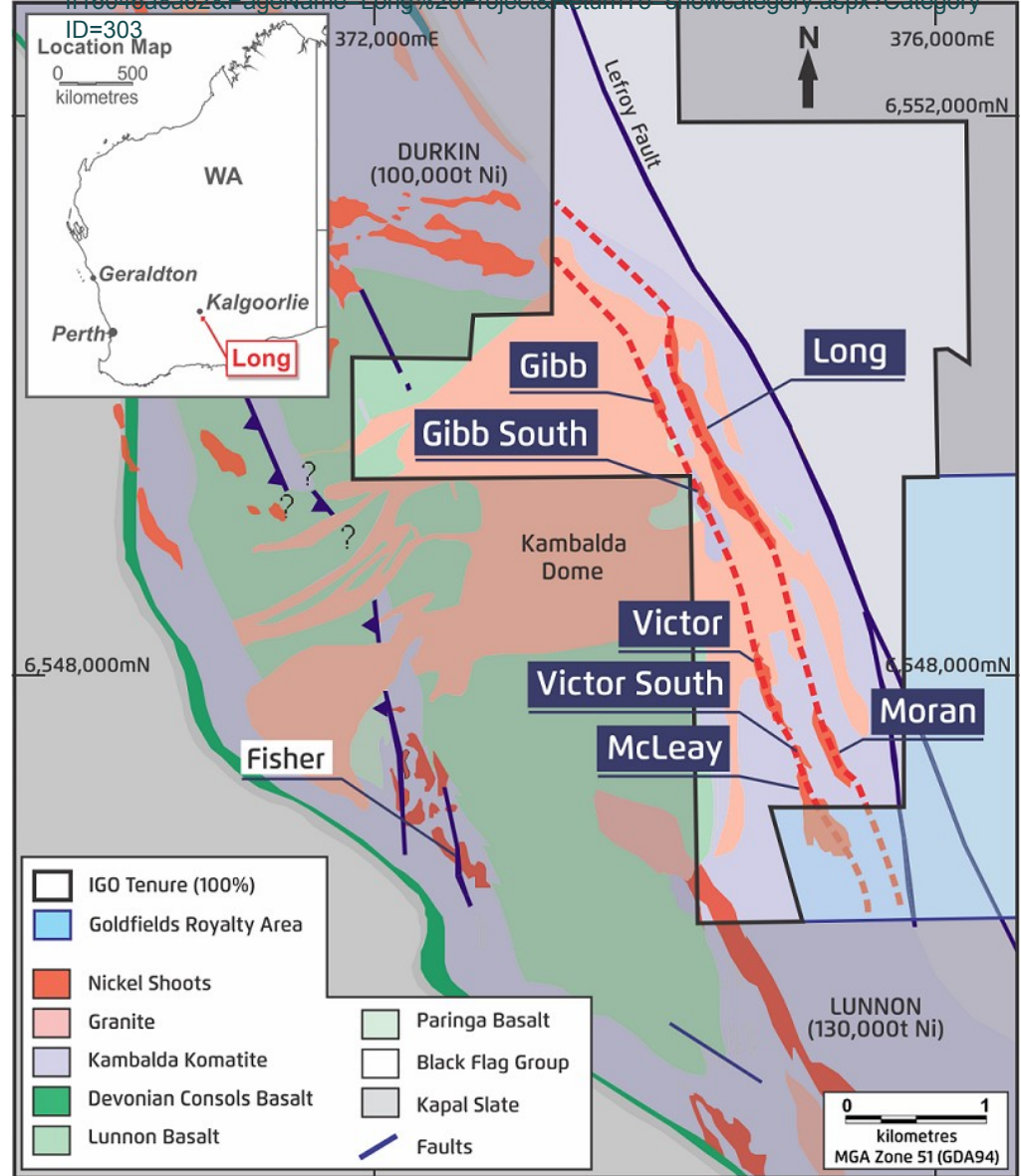
Vysvětluje chybějící velký objem vtroušeného chromitu → důsledek magmatických pulzů a následné eroze.



KAMBALDA – Ni DOLY



<https://www.igo.com.au/site/showcontent.aspx?CompanyPageUid=98da3f014312-9f6f-ff16046a8a62&PageName=Long%20Project&ReturnTo=showcategory.aspx?Category>



BUSHVELD COMPLEX

PGE, Ni-Cu

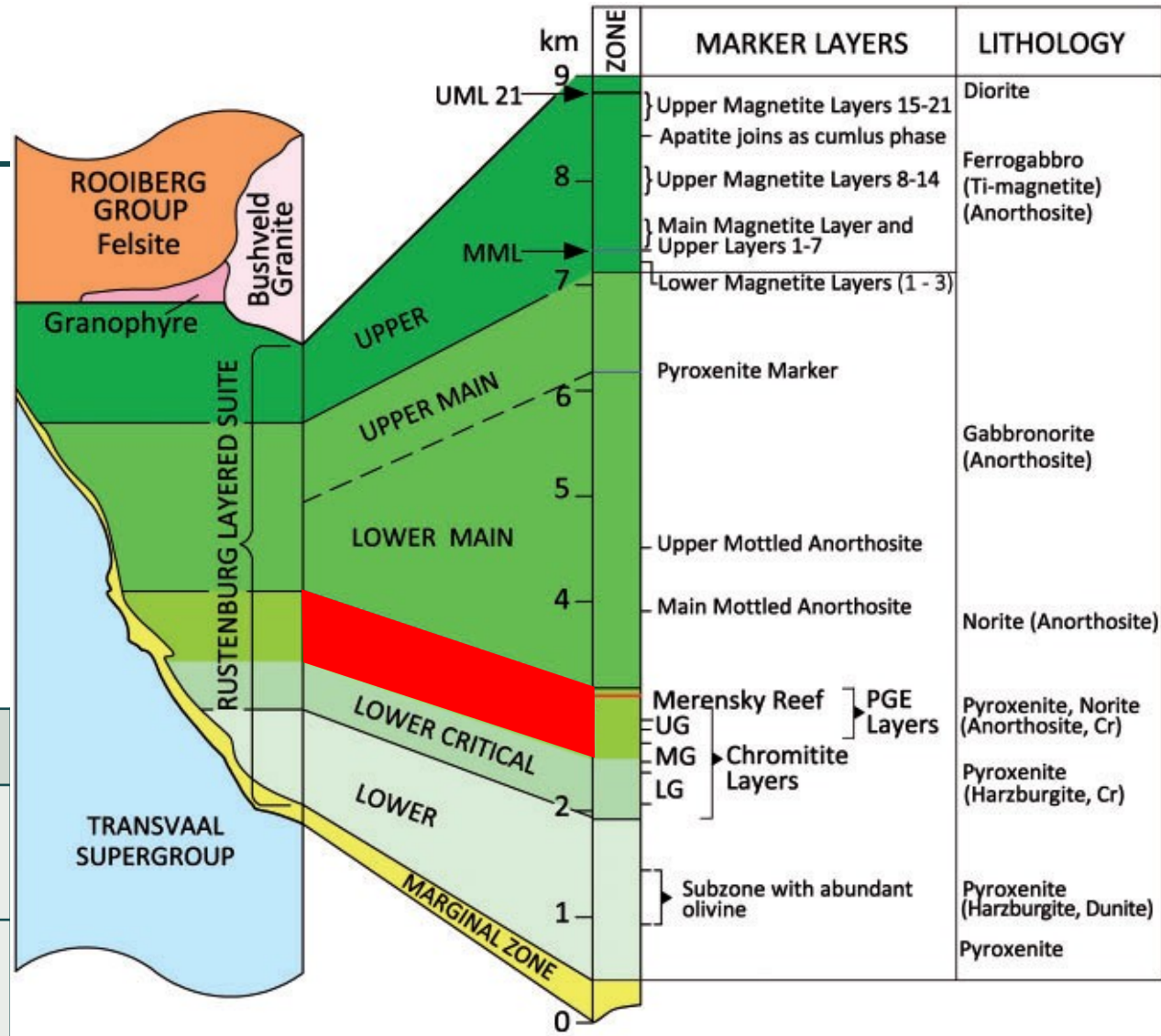
Scoon & Costin, 2018

- světově největší vrstevnatá mafická-ultramafická intruze (70 000 km²)
- vznik před 2.055 Ga

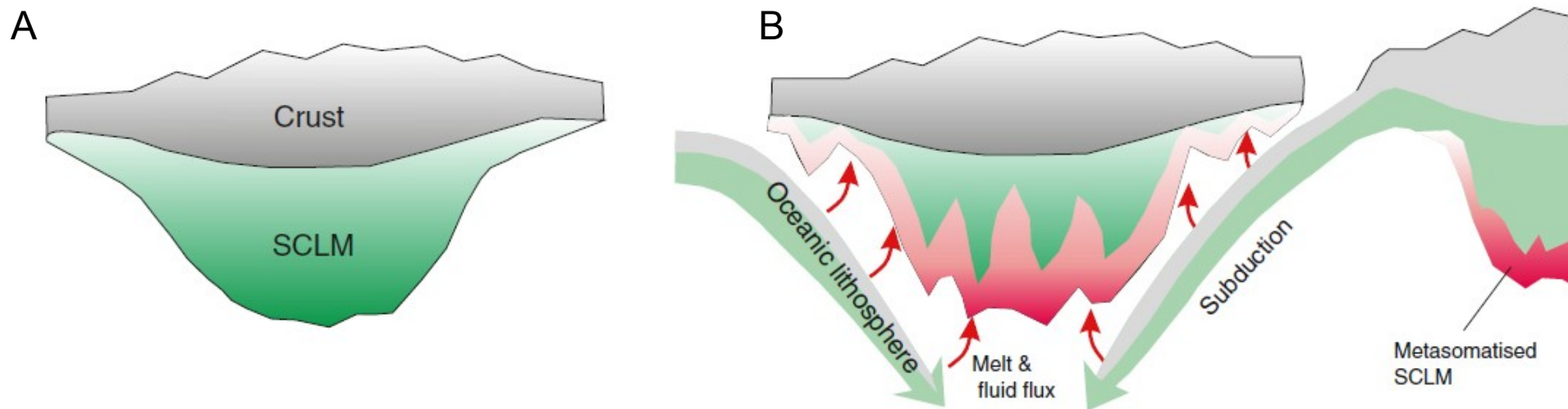
MINERALIZACE	
likvační	PGE, Ni-Cu
protomagmatická	Cr
	Fe-Ti-V

ROZLIŠUJEME 3 SKUPINY VYVRELYCH HORIN

Rooiberg group	nejstarší; felsit-ryolit + granofyr
Rustenburg layered suite	pyroxenit, gabro-norit, diorit



BUSHVELD – VZNIK LOŽISKA



upraveno podle Maier et al.
2013

A

Období středního Archaika –
kraton v nadloží sub-
kontinentálního litosférického
pláště (SCLM).

B

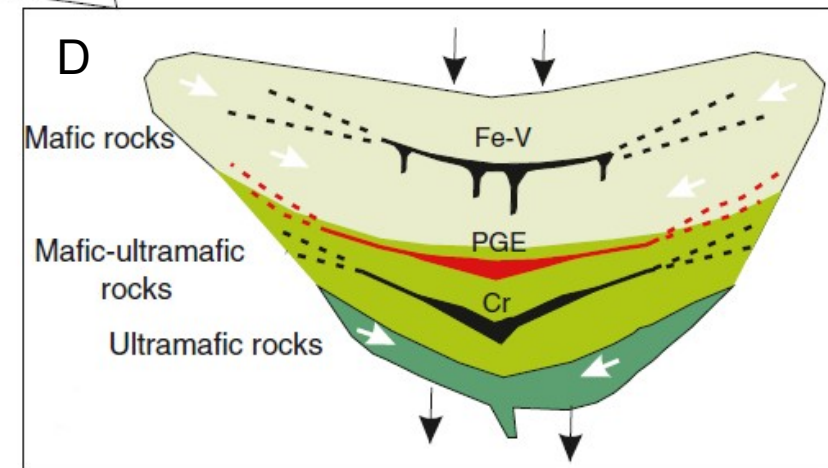
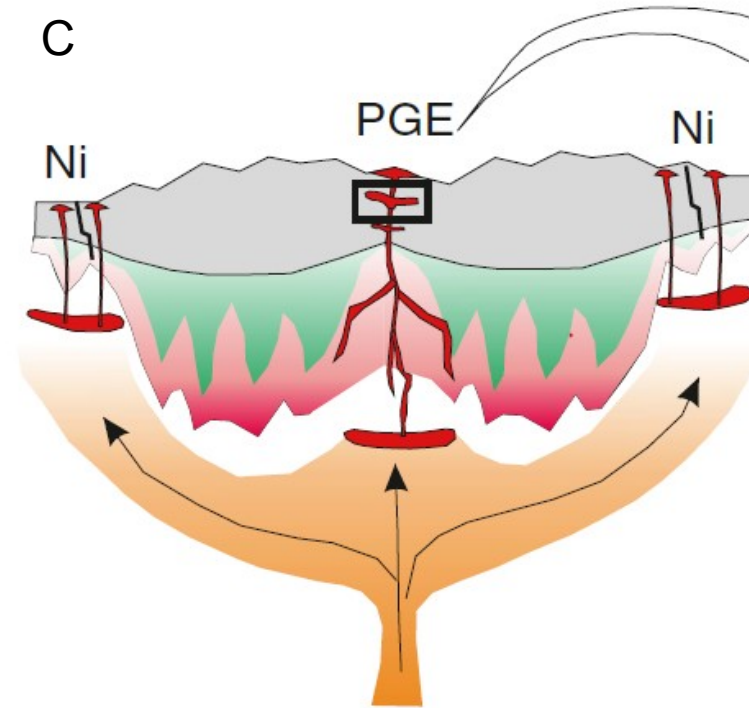
Období pozdní Archaikum až
Fanerozoium – alterace SCLM
metasomatickými fluidy odmišřených
během subdukce.

BUSHVELD – VZNIK LOŽISKA

C

Vzniklý plášťový chochol stoupal vzhůru a začal tavit okolní horninu. Vzniklá tavenina spolu s teplem generovaným chocholem injektovala do metasomatizovaného SCLM a způsobila jeho natavení.

Poté došlo ke smíchání obou tavenin a jejich výstupu podél trans-litosférické sutury až do kratonu, kde se vytvořily vrstevnaté intruze.



D

Vznik PGE, chromitových a magnetitových reefů s vtroušeninovou až masivní texturou. Nárůst objemu hornin v kůře po magmatickém pulzu způsobil centrální subsidenci.

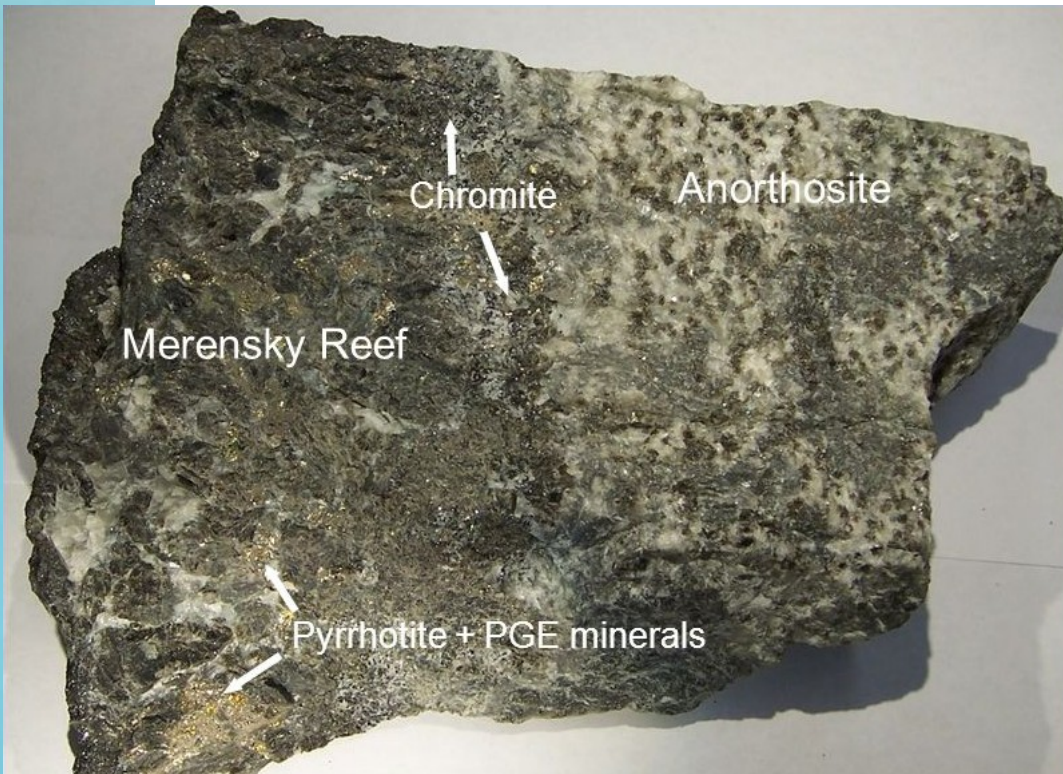
upraveno podle Maier et al.
2013

MERENSKY REEF

- hlavní zdroj PGE - v „**pegmatitickém živcovém pyroxenitu**“ gabro-norit
 - velmi hrubozrnný orthopyroxen (až 90 %) + plagioklas (až 30 %)
- 85 % (pyrhotin, pentlandit, chalkopyrit); zbytek pyrit, cubanit, millerit, troilit, vzácně galenit a sfalerit
- PGE, Ni, Cu, REE, P

PGE MINERALIZACE JE VÁZÁNA NA TŘI TYPY TEXTURNÍ ASOCIACE	
PGE uzavřené v sulfidech	38-97 %
PGE uzavřené v silikátech	3-62 %
PGE uzavřené nebo přidružené v chromitech či Fe-oxidech	v menší míře než ostatní

MERENSKY REEF

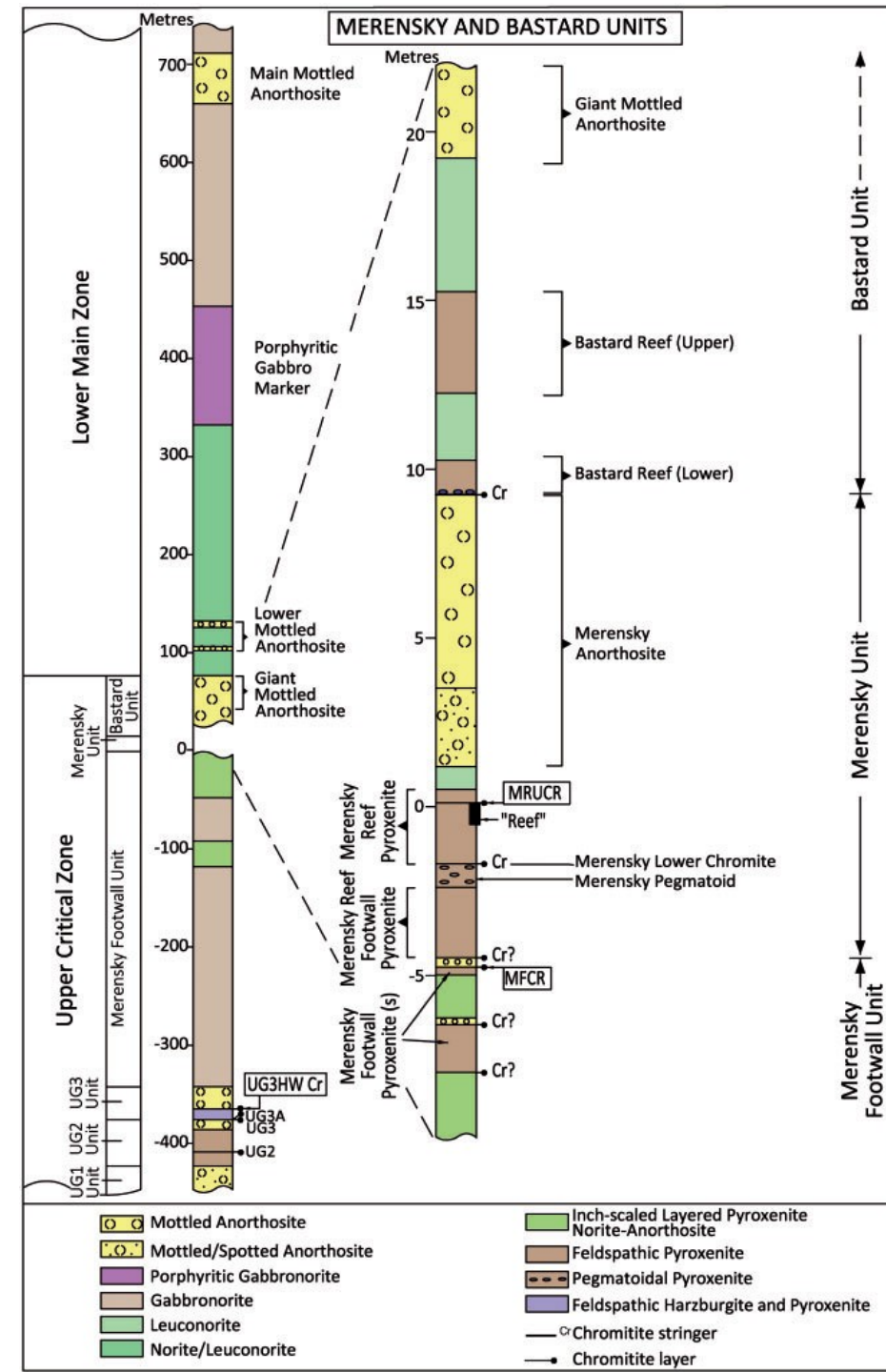


hrubozrnný hnědý pyroxen
a plagioklas →
pegmatitický pyroxenit

bílý anortozit s hnědě
zbarvenými zrny
pyroxenu

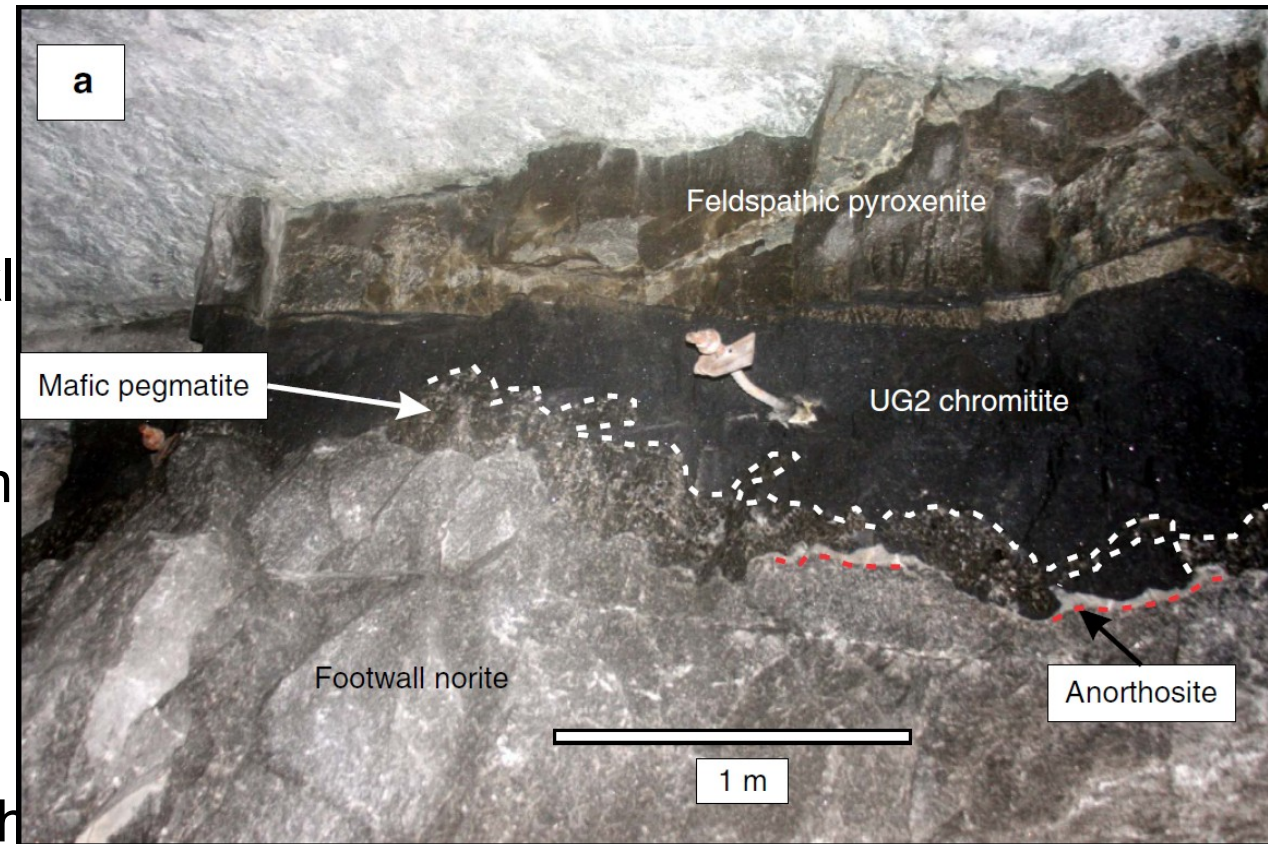
MERENSKY REEF – STRATIGRAFICKÉ SCHÉMA

- 80 % světových zásob PGE
- 22 % přímo v Merensky Reef
- PGE mineralizace také v chromitové vrstvě **UG2** a **Platreef**
- PGE mineralizace situována v nadloží chromitu



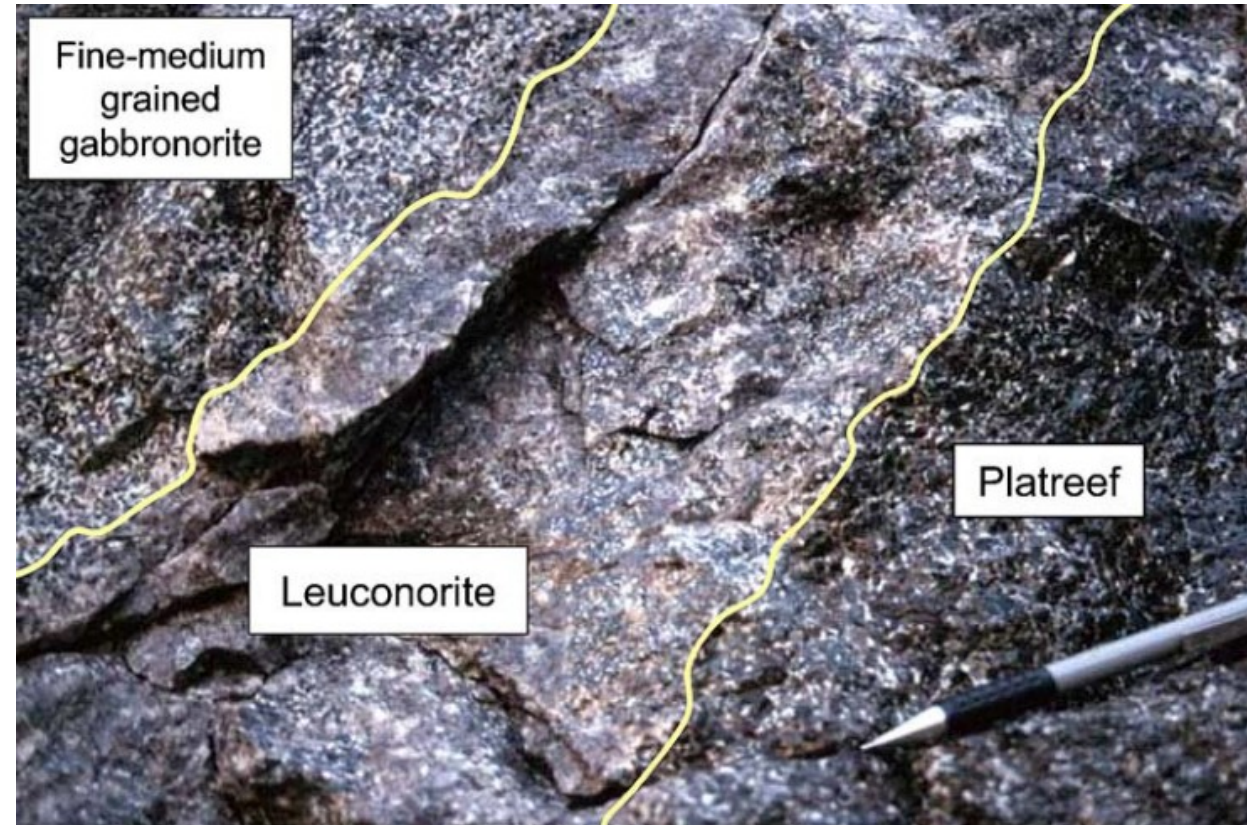
UG2 REEF (UPPER GROUP 2 REEF)

- chromitová vrstva UG2 leží přímo pod Merensky reefem v mocnosti 0.4-2.5 m
- 90 % chromit; zbytek pyroxen a plagiokl + akcesorie
- obsah Cr_2O_3 může dosahovat až 40 hm %
- minerály platinoidů - **PGE mezi 4-7 g/t**
- nikl i měď jsou v ppm vázány v sulfidech

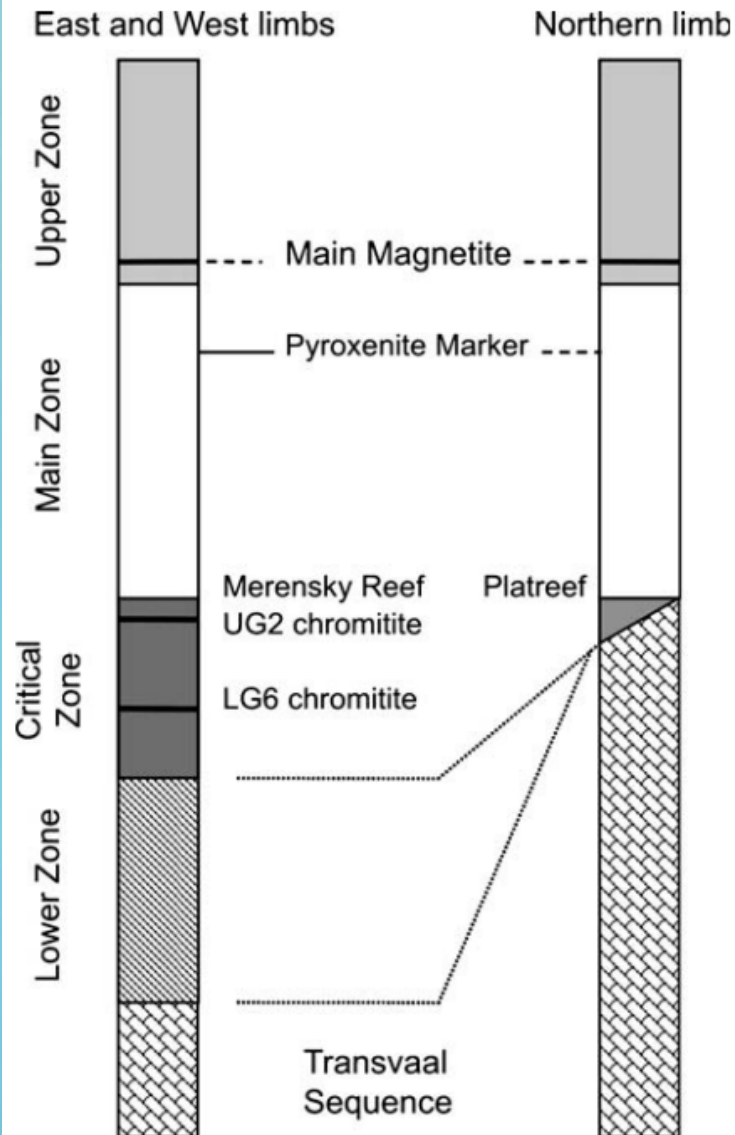


PLATREEF

- pouze v severní části komplexu, na kontaktu s podložními horninami Transvaalské superskupiny
- reakce horkého magmatu komplexu s podložními Ca-bohatými horninami
- asociace pyroxenitů se serpentinity a skarny
- mineralizace až 40 m mocná
- minerály platinoidů, pyroxeny, pyrhotin, pentlandit, chalkopyrit, pyrit



STRATIGRAFIE REEFÛ



McDonald et al. 2005

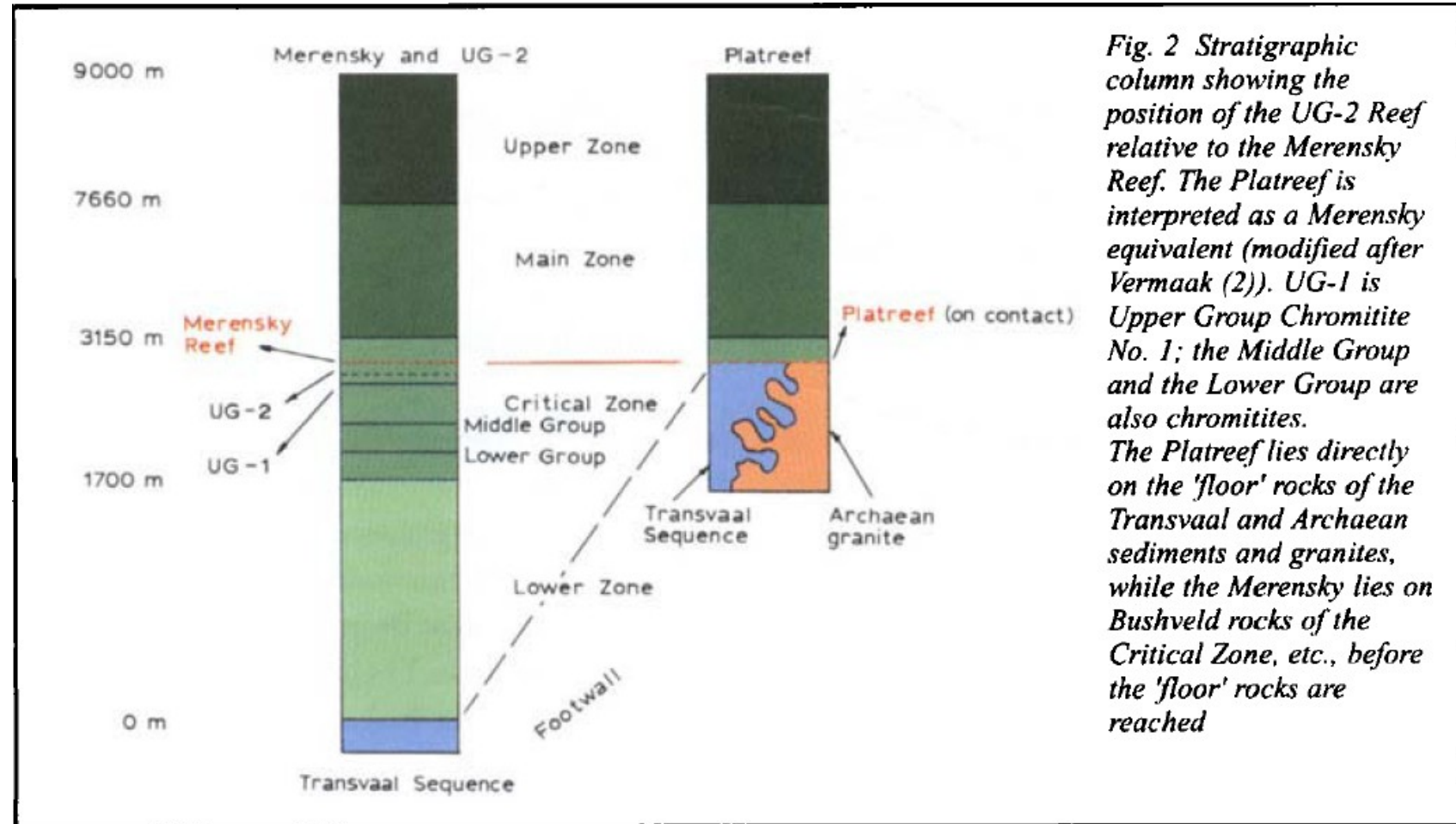


Fig. 2 Stratigraphic column showing the position of the UG-2 Reef relative to the Merensky Reef. The Platreef is interpreted as a Merensky equivalent (modified after Vermaak (2)). UG-1 is Upper Group Chromitite No. 1; the Middle Group and the Lower Group are also chromitites. The Platreef lies directly on the 'floor' rocks of the Transvaal and Archaean sediments and granites, while the Merensky lies on Bushveld rocks of the Critical Zone, etc., before the 'floor' rocks are reached

Schouwstra & Kinloch, 2000

SHRNUTÍ REEFŮ

MERENSKY REEF

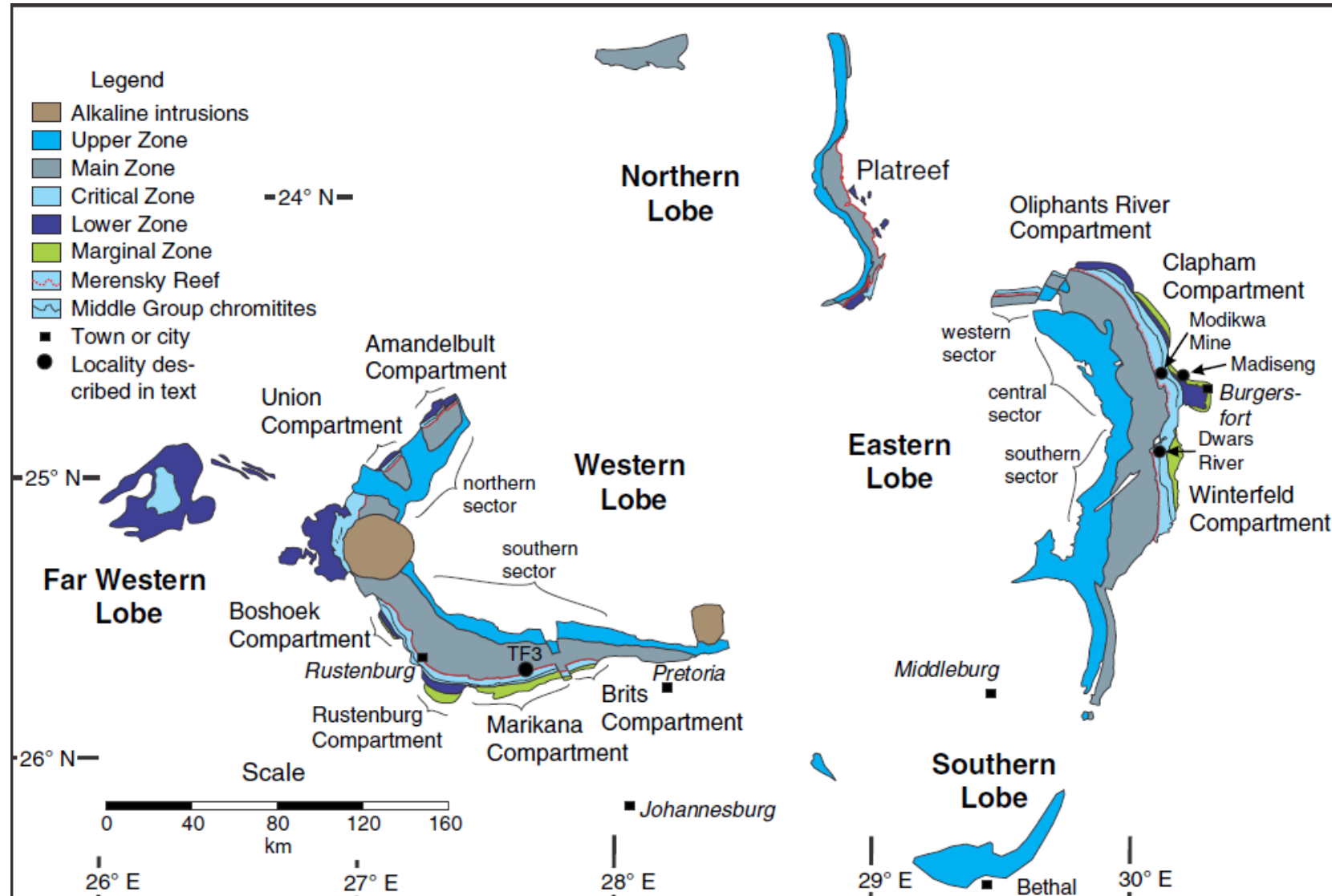
- táhne se přes celou západní a východní část komplexu
- 300 km délka, mocnost až 4 m

UG2 REEF

- 20-400 m pod Merensky reefem
- mocnost 0.5-2.5 m

PLATREEF

- vázán na severní část komplexu
- délka ca. 30 km, mocnost 10-300 m





PROTOMAGMATICKÁ LOŽISKA

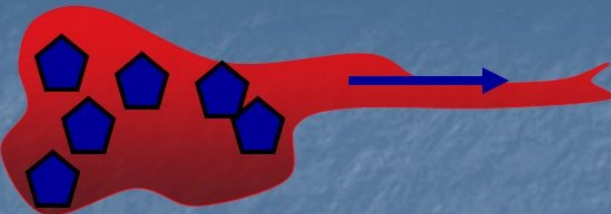
FRAKČNÍ KRYSTALIZACE

Three ways crystals separate from a melt:

34

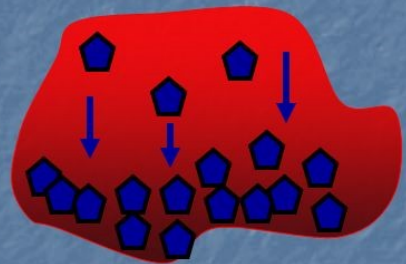
Filter pressing:

- Remaining melt is pushed through a fracture and separated from solidified melt.



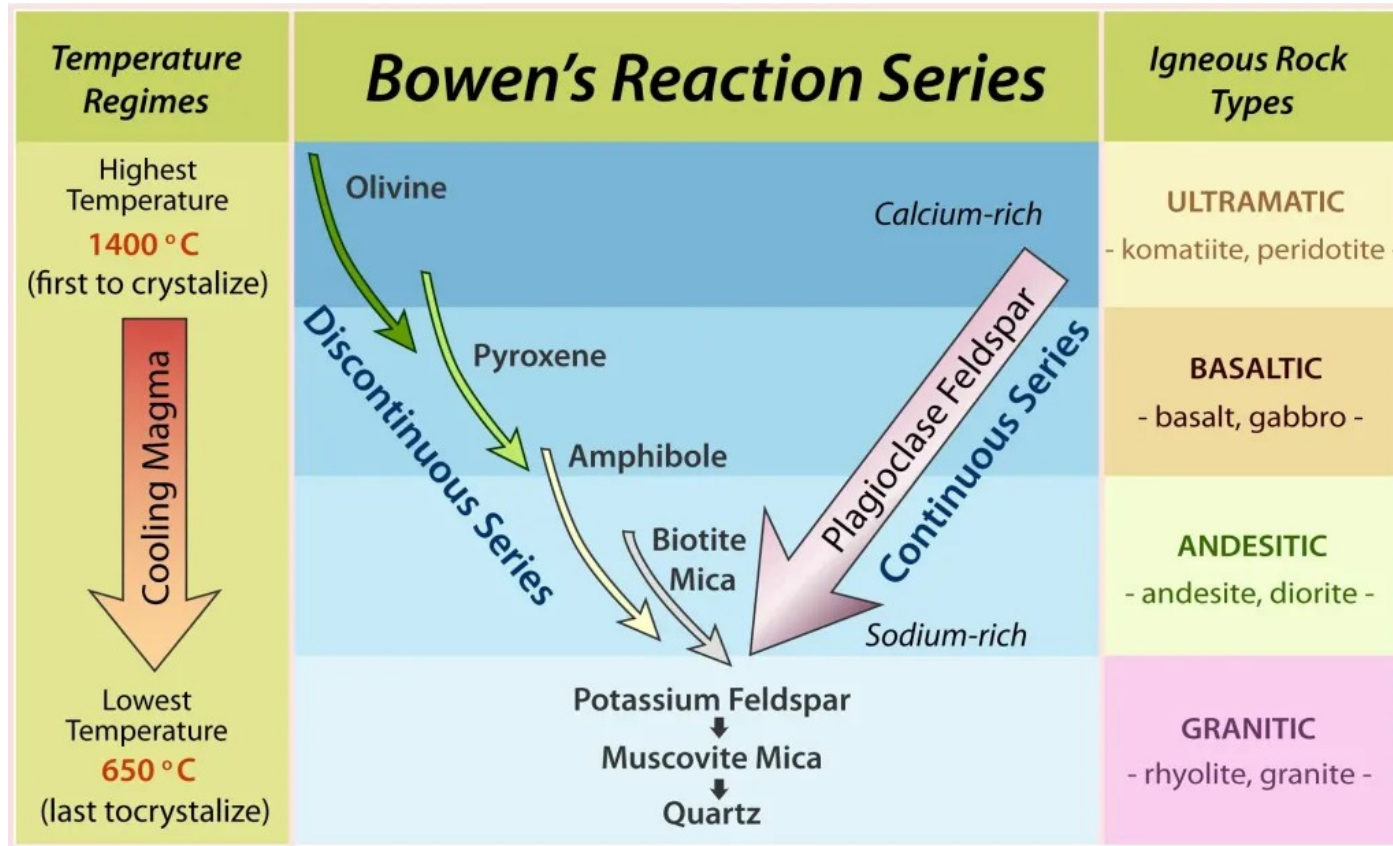
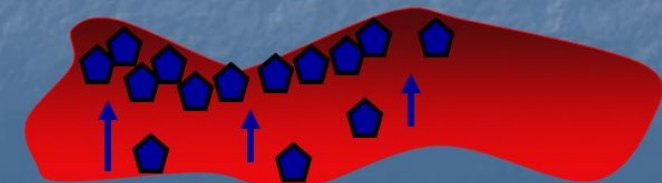
Crystal settling:

- The first minerals to solidify are denser and sink to the bottom.



Crystal floatation

- The first crystals are less dense and rise to the top.



ložiska Cr, Fe-Ti-V, PGE, a
diamantů

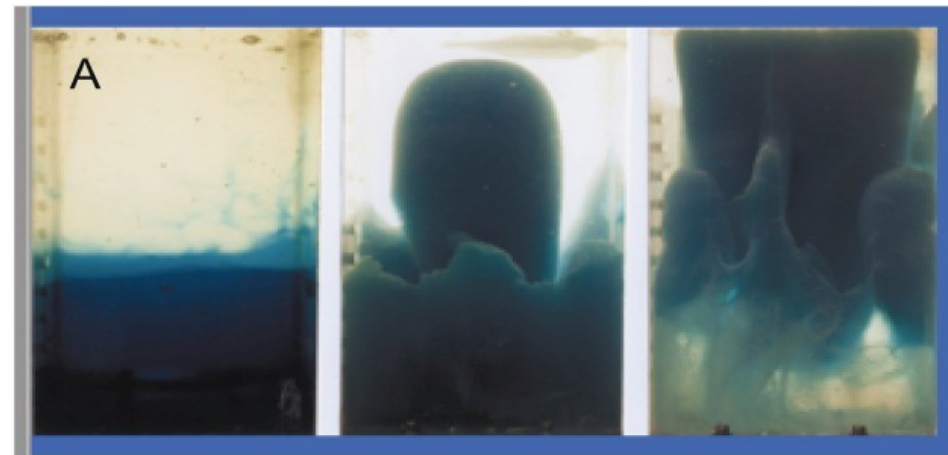
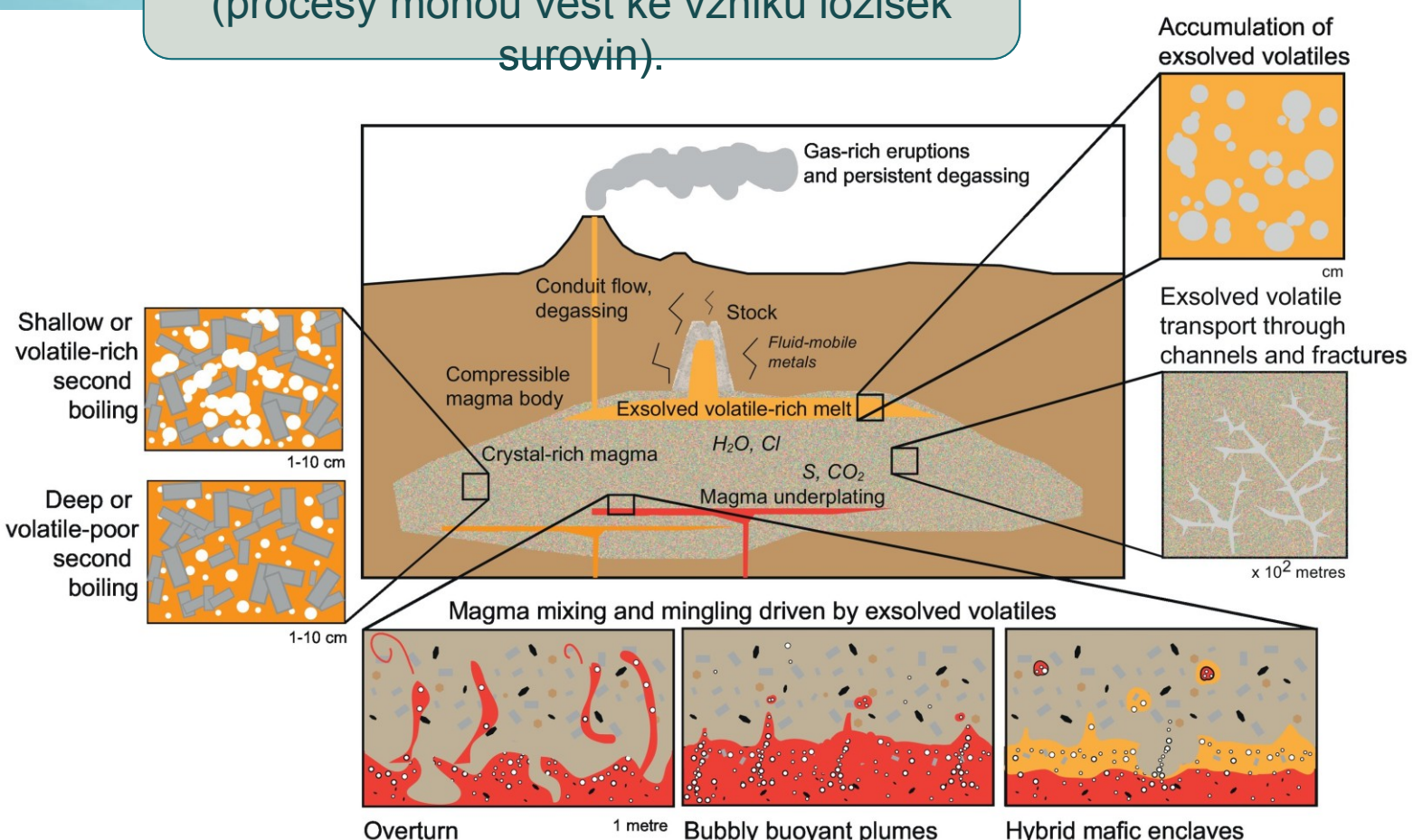
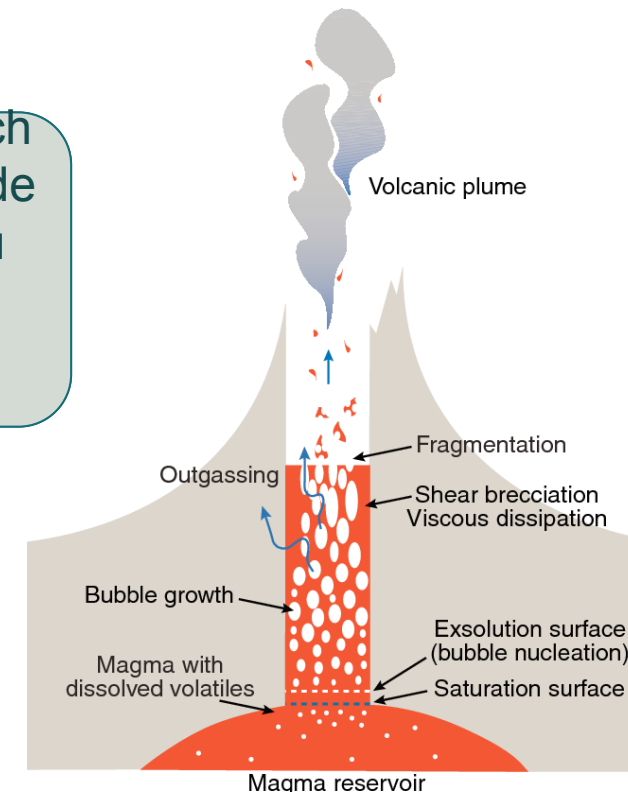


chromit, ilmenit, magnetit, hematit,
apatit

EXSOLUCE FLUID

V hloubce fluida mohou reagovat s okolím nebo se míchat s povrchovou vodou (procesy mohou vést ke vzniku ložisek surovin).

V přípovrchových podmínkách vede k explozivnímu vývoji intruze taveniny a k úniku fluid.



PROTOMAGMATICKÁ LOŽISKA

- tzv. ranně magmatická ložiska vznikla procesy **frakční krystalizace**, kdy ložiskotvorné minerály vykristalovaly dříve než samotná hornina

HLAVNÍ MINERÁLY	
chromit	FeCr_2O_4
ilmenit	FeTiO_3
magnetit	Fe_3O_4
diamant	C
PGE, sulfidy, REE	

TEXTURY
vtroušeninová
masivní

LOŽISKA		
Great Dyke	zimbabwský kraton	ZW
Stillwater Complex	wyoming kraton	US A
Bushveld !Cr, Fe-Ti-V!	Kaapvaal kraton	JAR
Kimberley	Kimberley kraton	JAR
Mir	sibiřský kraton	RU
Argyle	Halls Creek orogen	AU

LOŽISKA CHROMITU

STRATIFORMNÍ

vrstevnatá intruze

archaikum - proterozoikum

peridotity, pyroxenity, gabra, anortozity

Bushveld, Great Dyke, Stillwater Complex

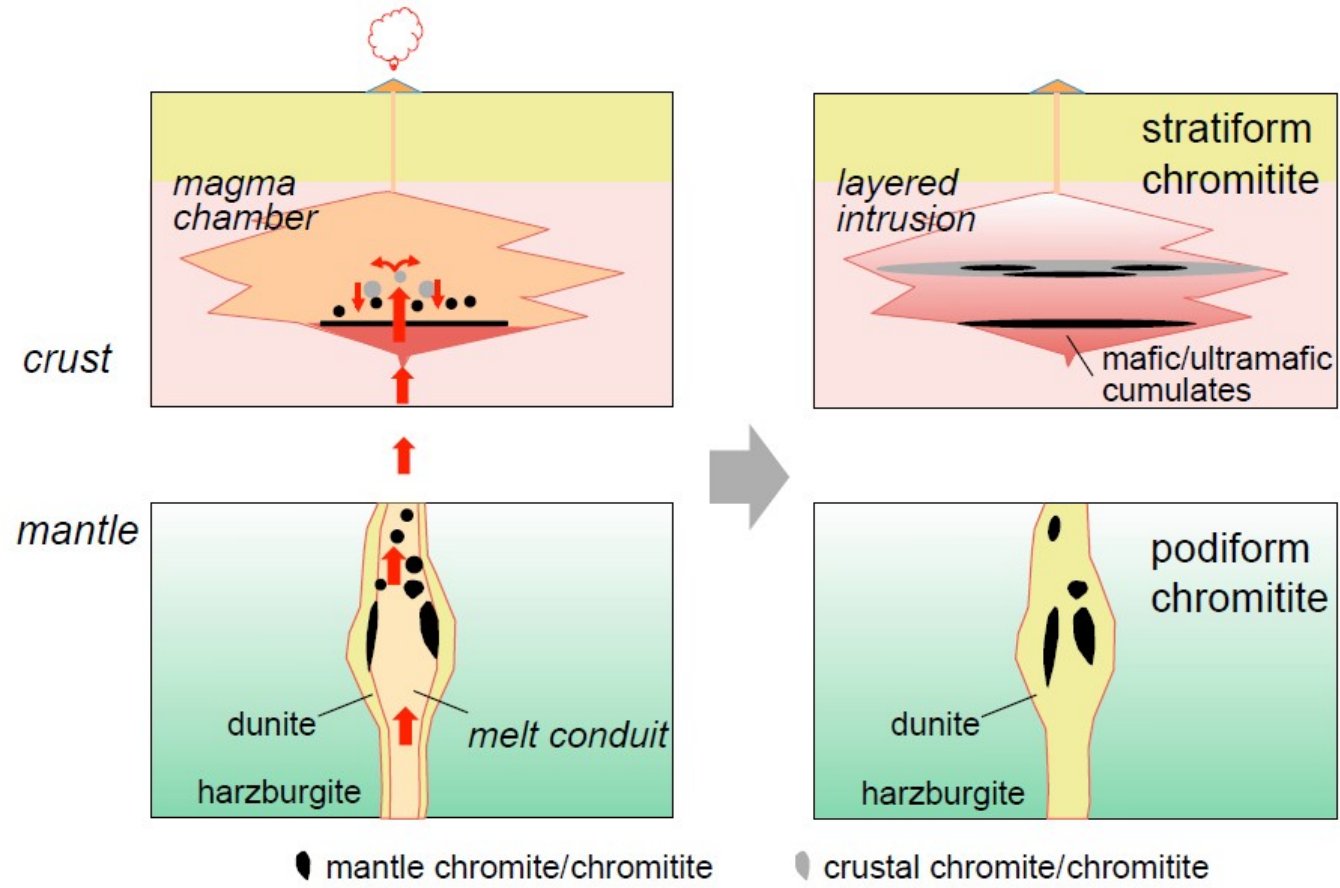
PODIFORMNÍ

čočkovitá tělesa

pozdní proterozoikum - fanerozoikum

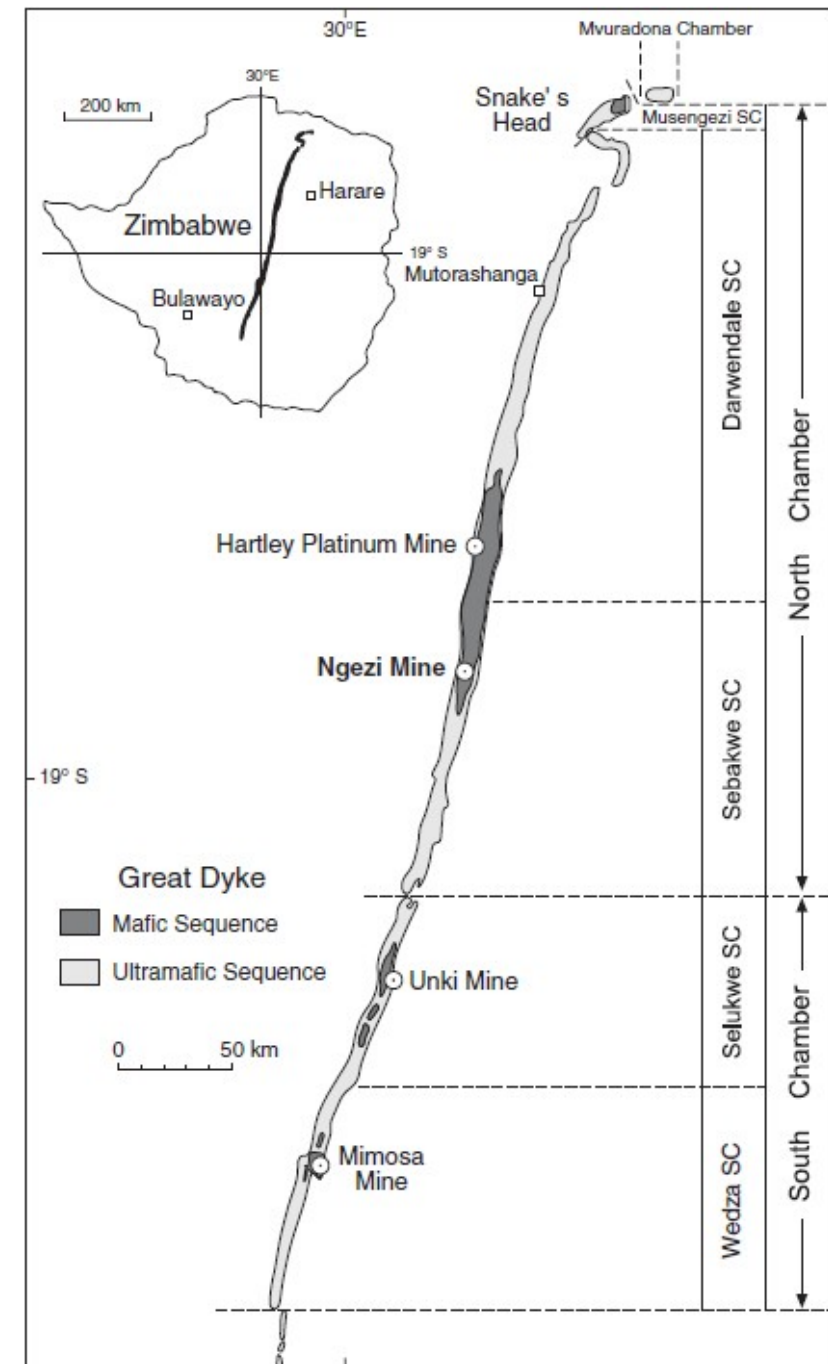
ofiolity – dunity, harzburgity

Kempirsai Ultramafic Massif

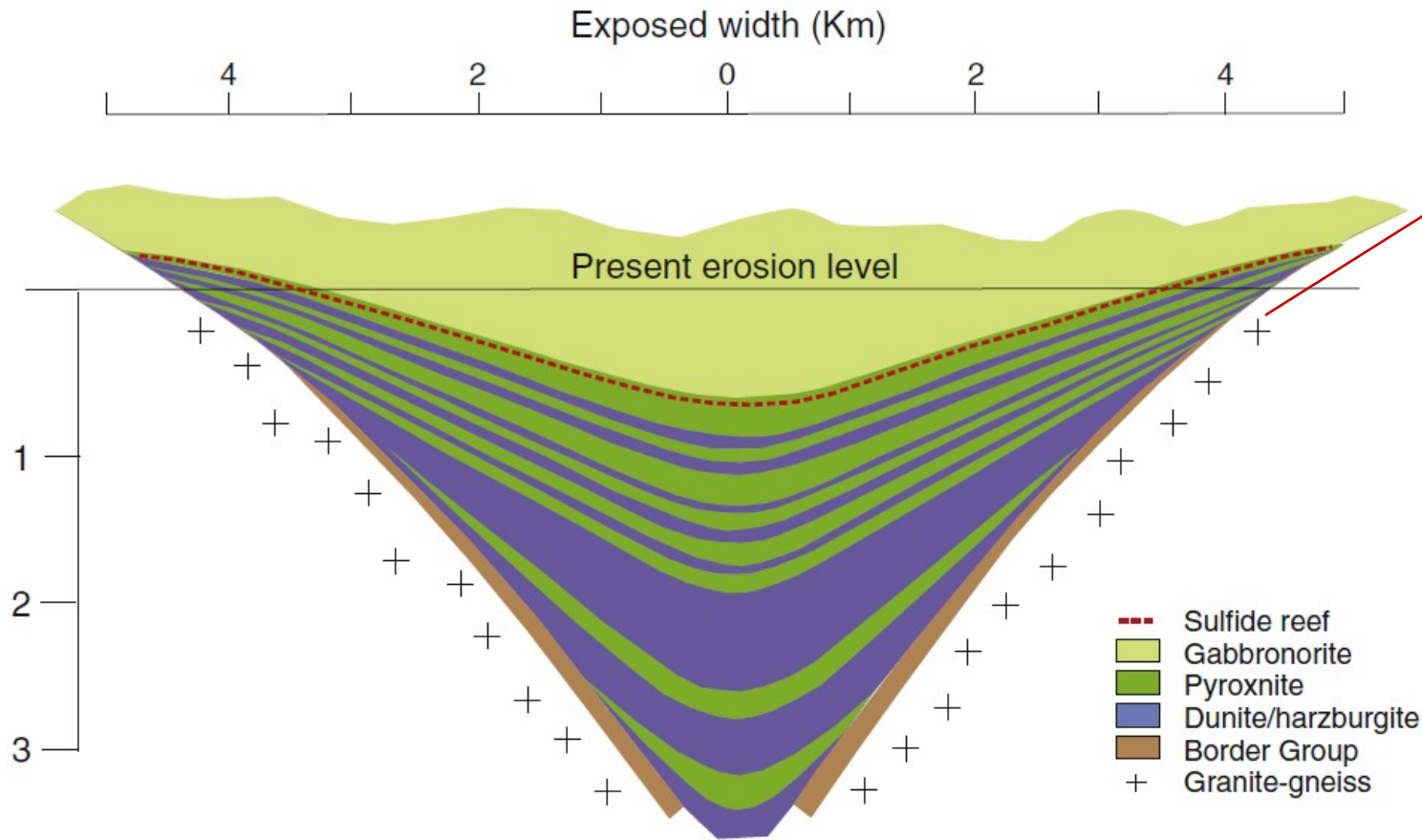


GREAT DYKE Cr, PGE, Ni-Cu

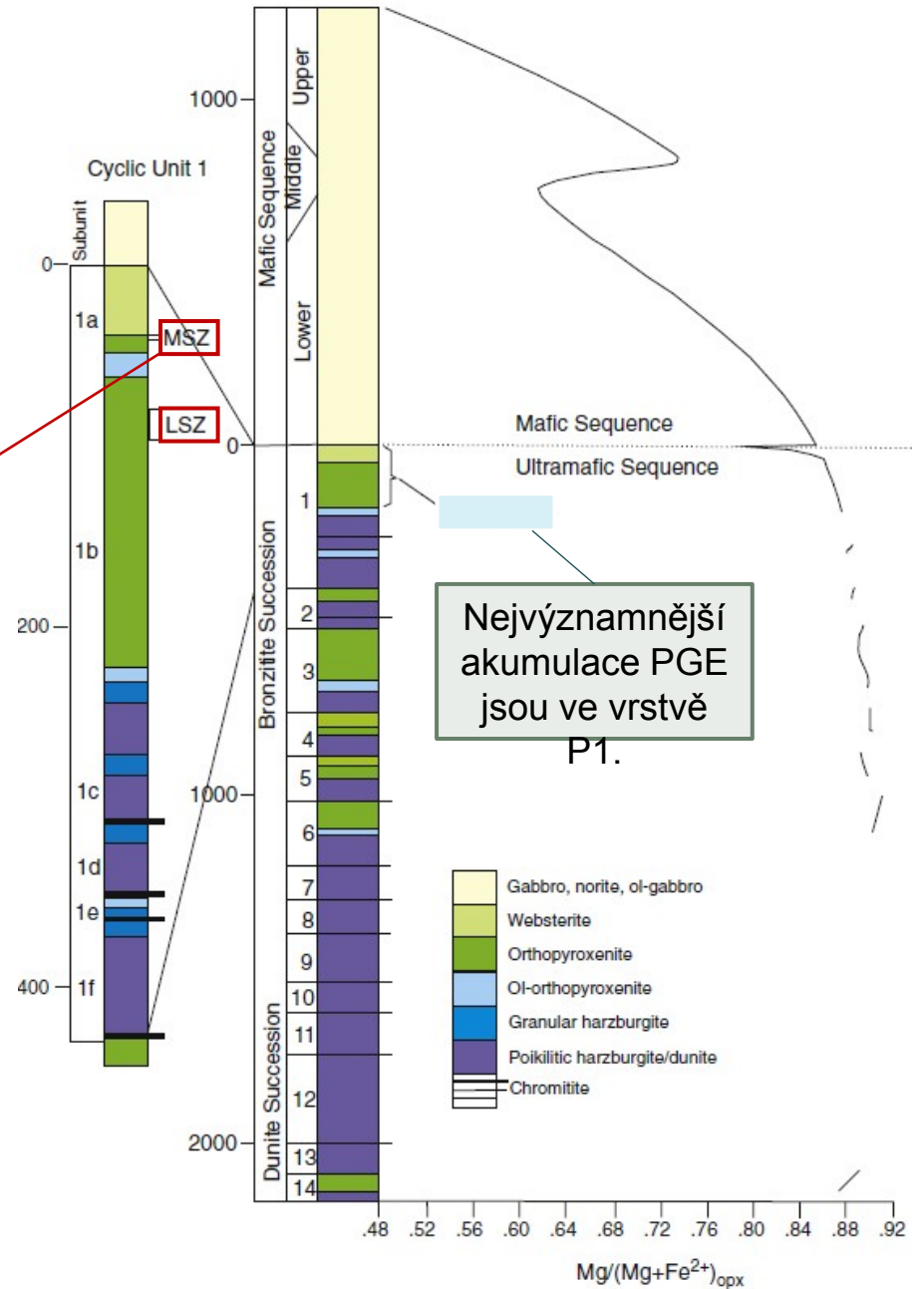
- druhé největší ložisko PGE
- protáhé těleso vyvřelých hornin intrudovalo do archaických granitoidů a pásma zelenokamenů v zimbabwském kratonu před cca 2.575 Ga
- chromitové polohy jsou vázány na **dunity až pyroxenity** (bronzitit)
- PGE mineralizace je vázána na horizonty chromititů nebo silikátů
- pyrhotin, pentlandit, chalkopyrit, vzácně pyrit



GREAT DYKE - STRATIGRAFIE

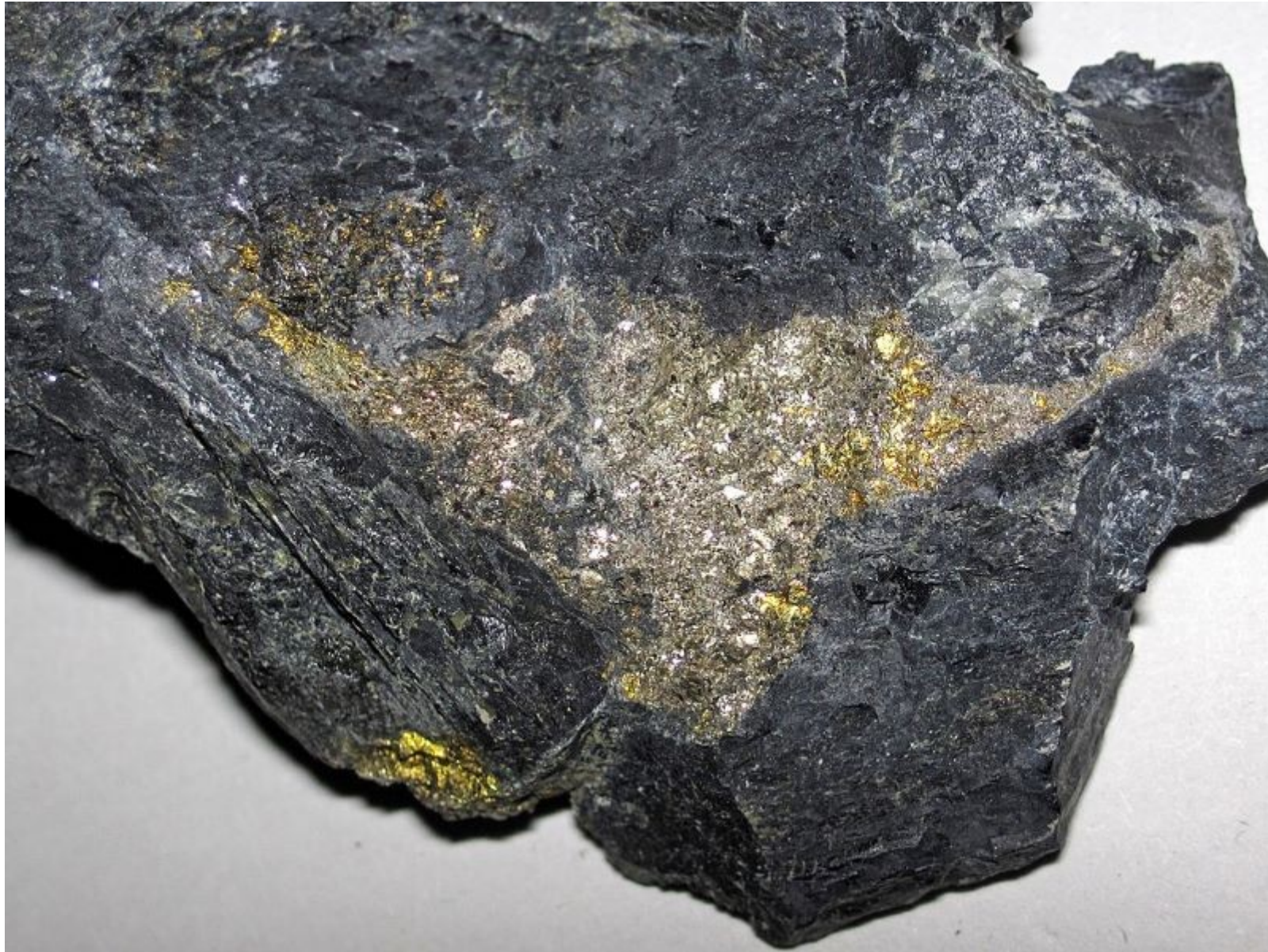


Maier et al. 2015



Maier et al. 2015

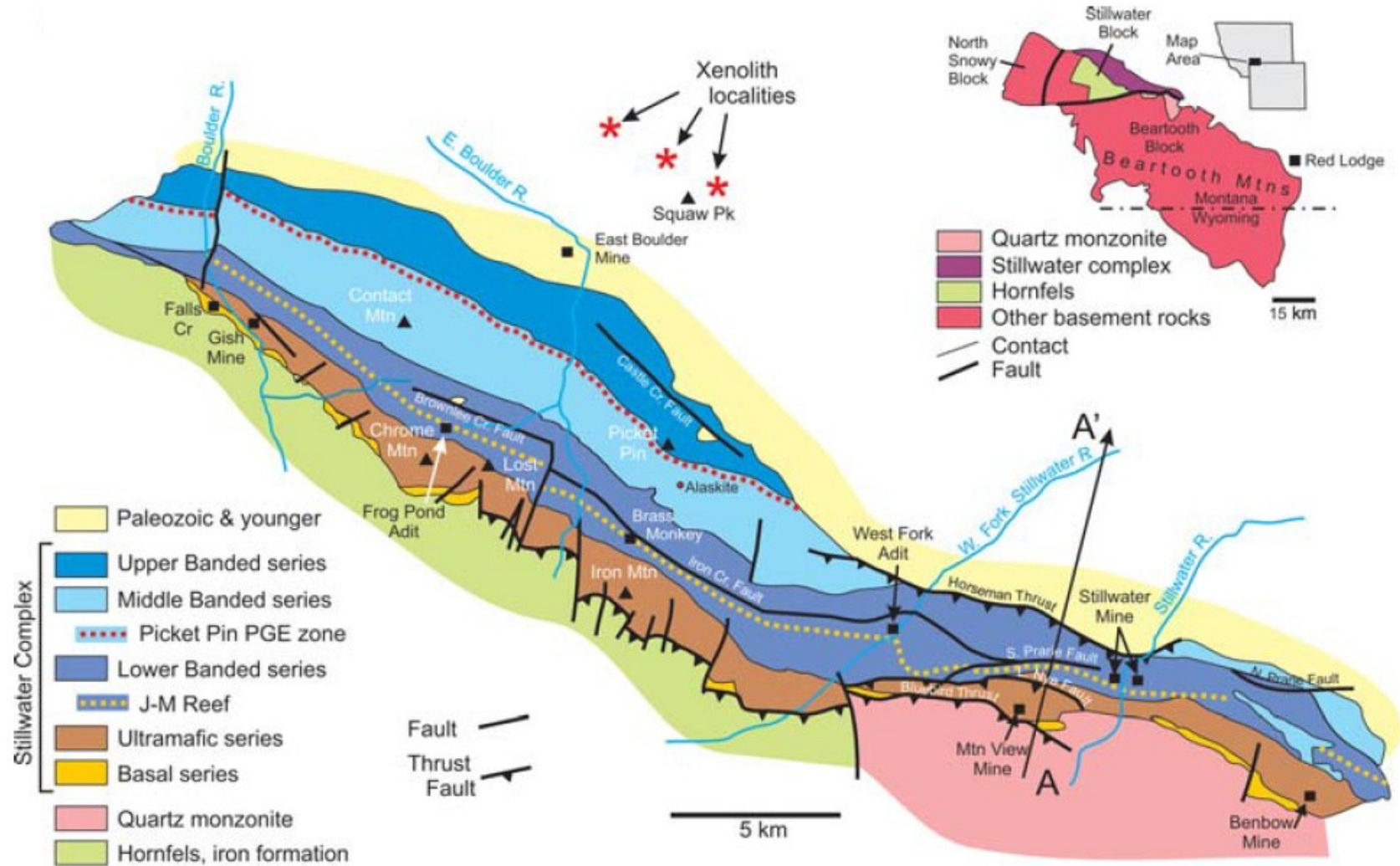
PGE-nosná sulfidická mineralizace



STILLWATER COMPLEX PGE, Cr, Fe-Ni-Cu

vrstevnatá ultramafická
intruze vzniklá před 2.7
Ga

mineralizace vázána na
tzv. **Basal Series,**
Ultramafic Series a
Banded Series



STILLWATER COMPLEX

BASAL SERIES

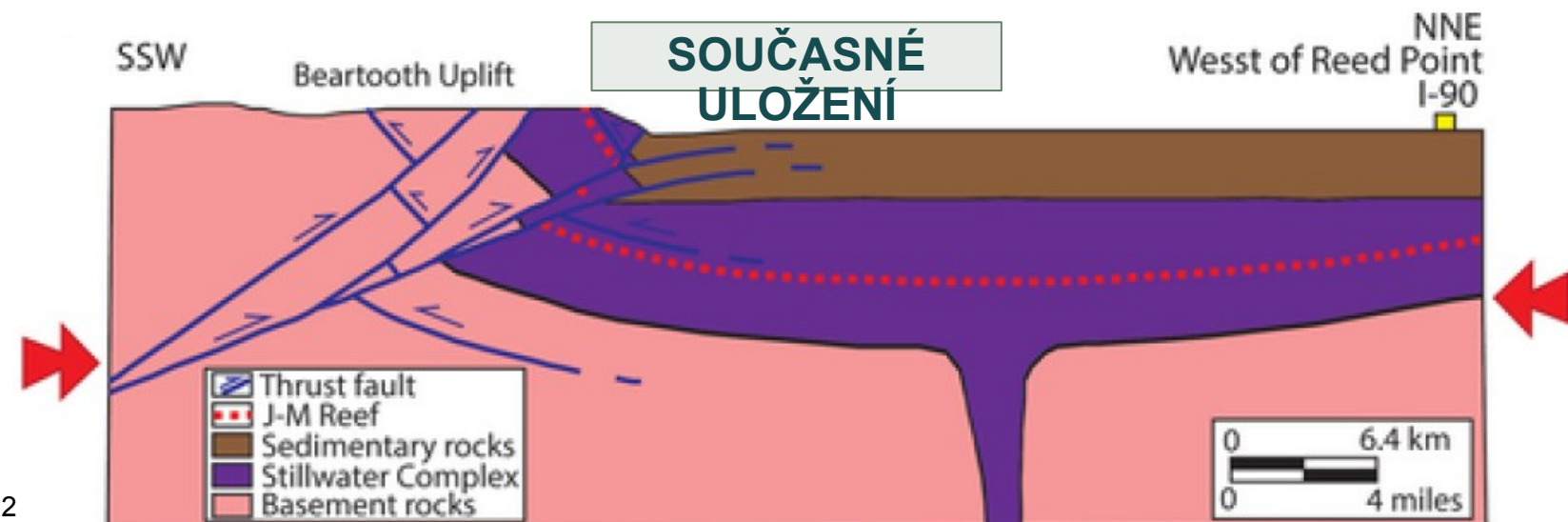
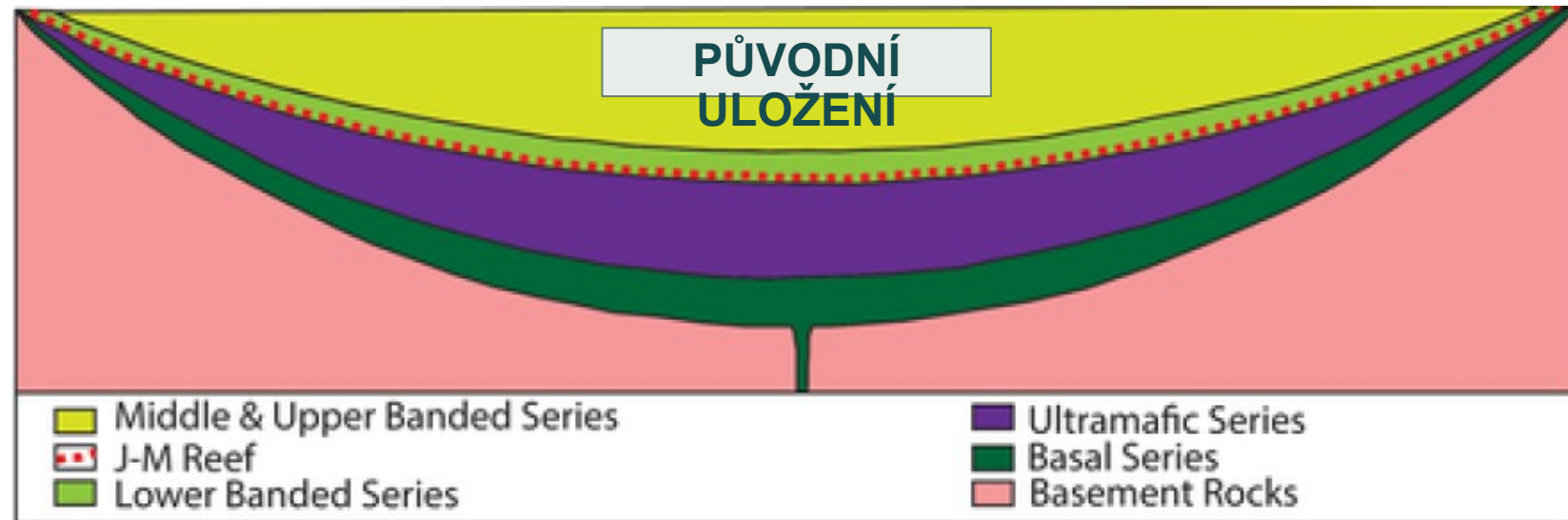
sulfidická mineralizace **Fe-Ni-Cu**
vázána na nority

ULTRAMAFIC SERIES

chromity vázány na cyklicky se
opakující dunity, harzburgity a
ortopyroxeny

BANDED SERIES

J-M Reef (Johns-Manville) s
PGE vázaný na kontakt
gabronoritů s anortozity

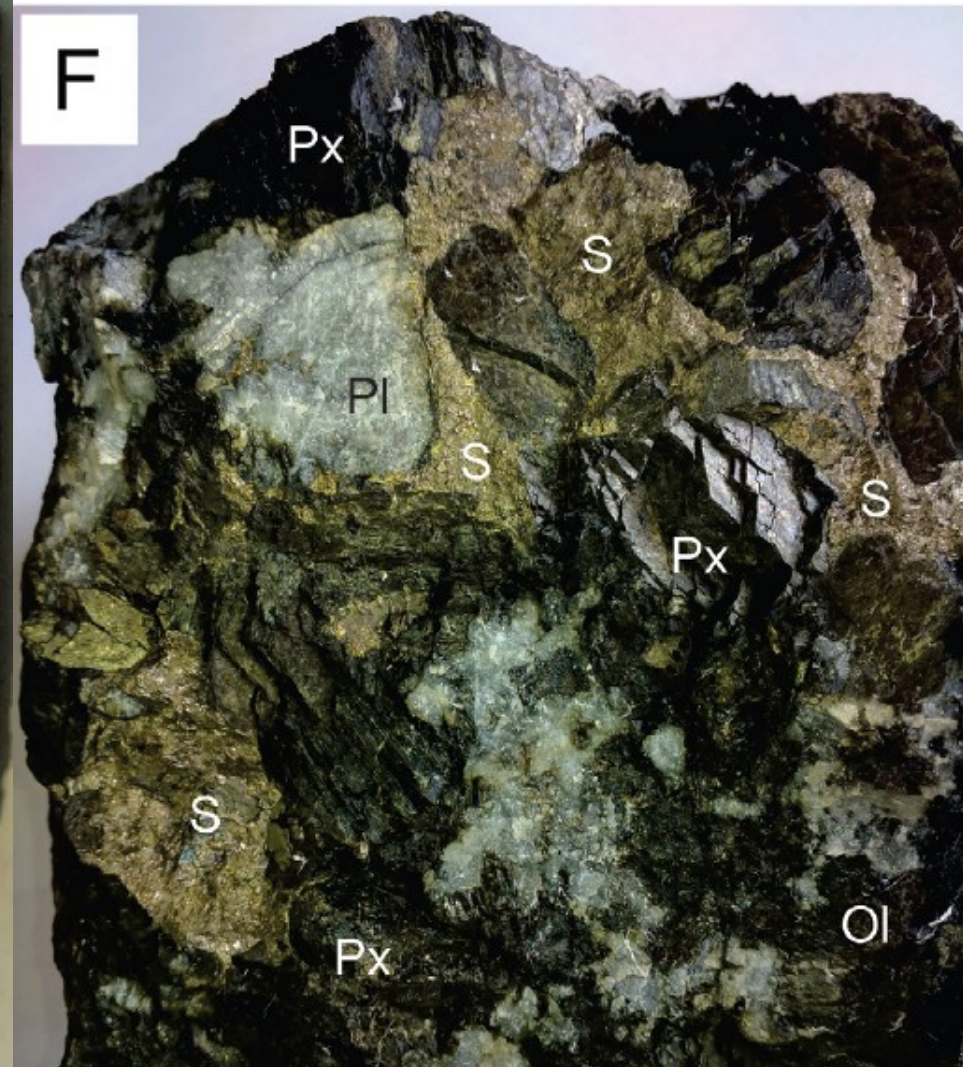




chromitové polohy v Ultramafic Series



mineralizovaný anortozit J-M Reefu



mineralizovaný gabronorit J-M Reefu

BUSHVELD COMPLEX

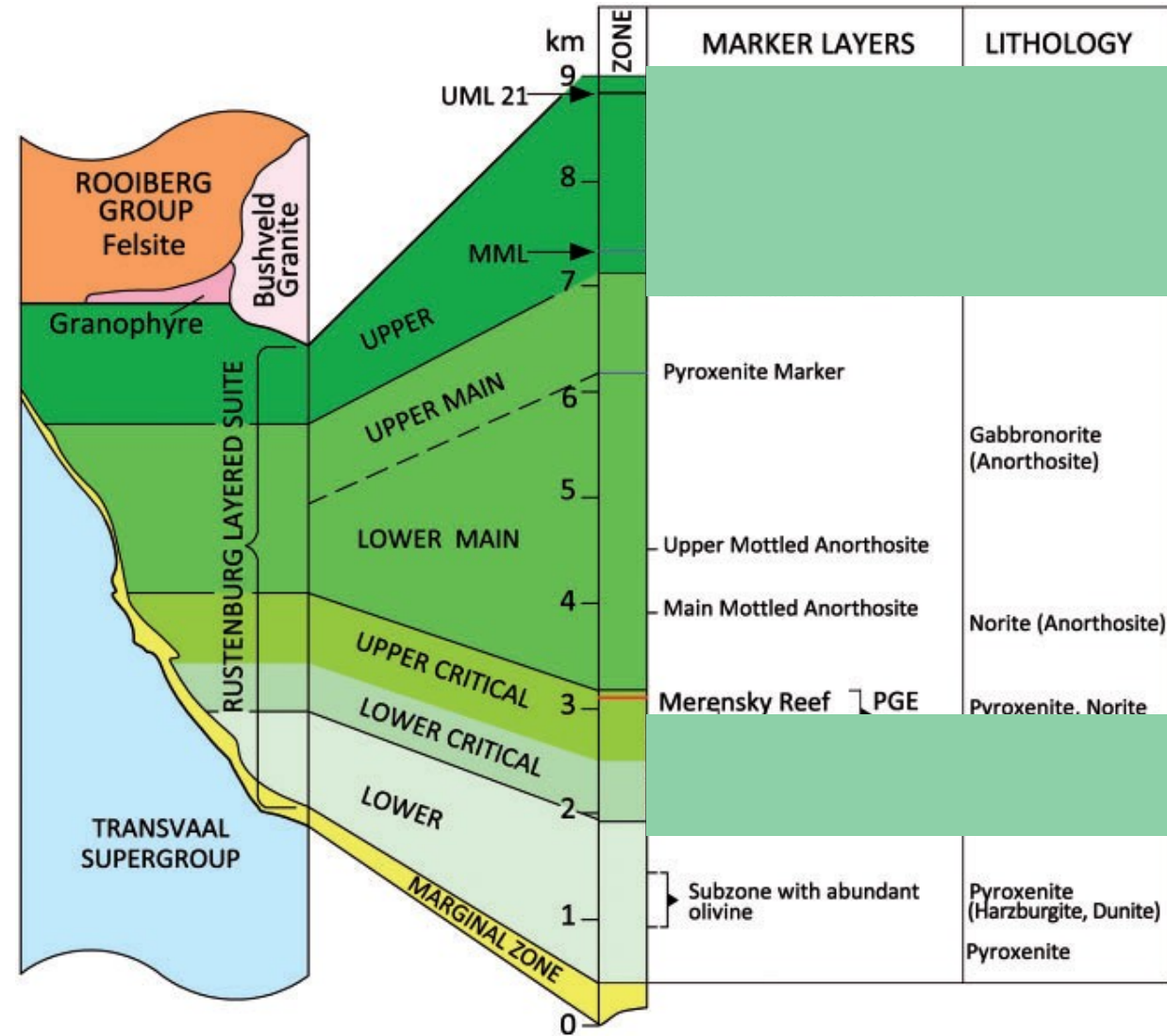
Cr, Fe-Ti-V

- 75% světových zásob chromitu
- všechny rudní polohy jsou součástí **Rustenburg layered suite**
- chromitové a magnetitové polohy vznikly gravitační diferenciací

Cr
chromit, Cr-spinel
thin vs thick layers (cm až 2 m)
vtroušeninové až masivní textury
Fe-Ti-V
magnetit, ilmenit
obsahy V a Ti mají negativní korelaci – směrem vzhůru koncentrace V klesá a Ti stoupá
vtroušeninové až masivní textury

BUSHVELD COMPLEX

- nejrozsáhlejší polohy chromititů leží v **lower and upper Critical Zone** a jsou vázány na pyroxenity a nority
- magnetitem nabohacené vrstvy leží v **Upper Zone** a jsou vázány na gabra a anortozity



BUSHVELD COMPLEX – CHROMITOVÉ POLOHY

Chromitová poloha **UG1** je vázán na anortozity, nikoliv na pyroxenity.

Chromitová poloha **LG6** je nejvýznamnější z hlediska produkce a zásob.



Pebane & Latypov, 2017



Latypov et al. 2018

LOŽISKA DIAMANTŮ

- diamantonosné horniny jsou vázány na staré subdukční zóny
- stáří – mezozoikum, kenozoikum, devon (většina kimberlitů intruduje do starších hornin)
- diatrema – hloubka 1000 – 1500 m
- diamant = HP varieta uhlíku → stabilní při tlaku vyšší než 4 GPa a T 1000 °C (v hloubce vyšší než 150 km) → záleží na termickém gradientu
- **nekrystalizují z kimberlitu** → jedná se o úlomky pláště, které se na povrch dostaly jako xenokrysty nebo v xenolitech
- generovány ve spodní kůře (je zde dost C a více H₂O než ve svrchním plášti)

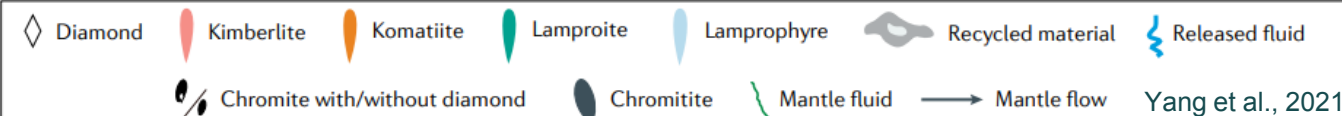
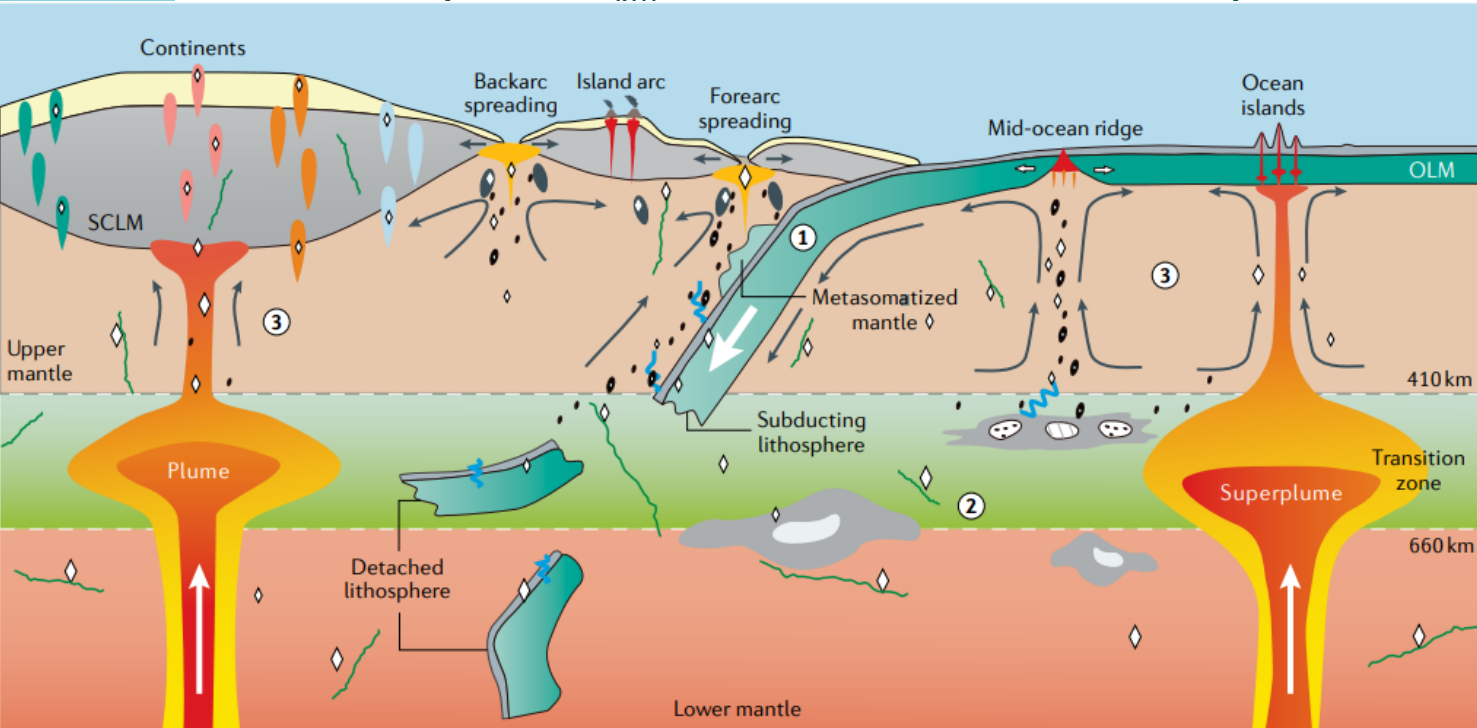
FRAKČNÍ KRYSTALIZACE

100-150 km

Subdukce oceánské kůry s karbonátovými sedimenty a asimilace litosférické kůry.

150-200 km

Dehydratace a tavení subdukujícího materiálu. Rozklad karbonátů a vznik fluid s CO_2



Redukce CO_2 a vznik zárodků diamantů z C-bohatých fluid ve vystupující magmatické tavenině.

Dorůstání diamantových krystalů ve vystupujícím ultrabazickém magmatu.

Diamanty jsou obvykle vyneseny k povrchu magmaty vázanými na kontinenty – kimberlity, lamproity, lamprofyry či komatiity – charakteristické velmi rychlým výstupem (70 km/h), s často mohutnou explozí při proražení nejsvrchnější části zemské kůry.

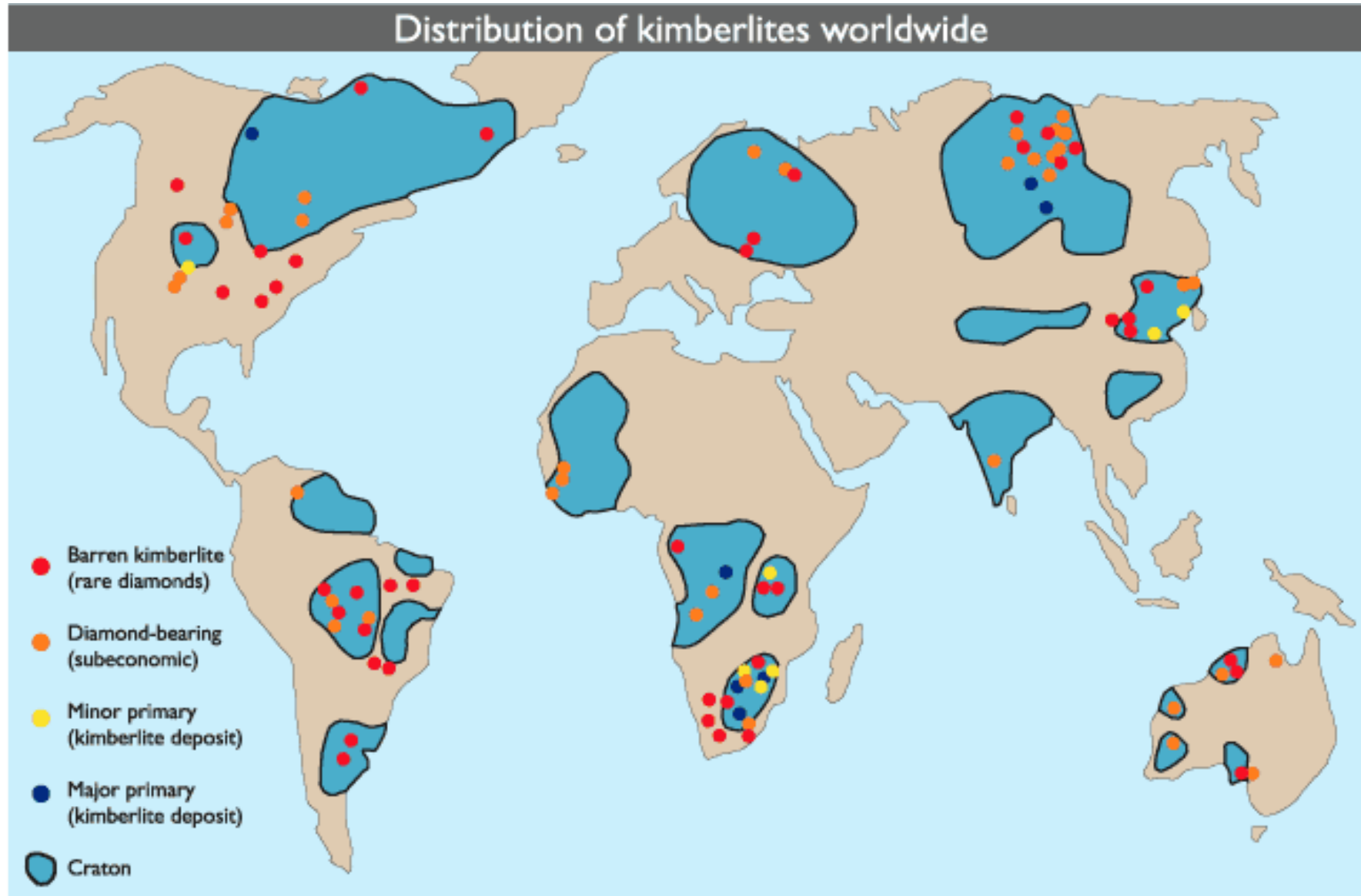
Diamanty se ale mohou vázat i na ofiolitovou sekvenci, kde jsou uzavřeny v chromitech.

Diamantonosné chromity jsou vyneseny v zestupnou plášťovou konvekci do svrchního pláště, kde se promísí s obyčejnými chromity a vytvoří podifonní ložiska.

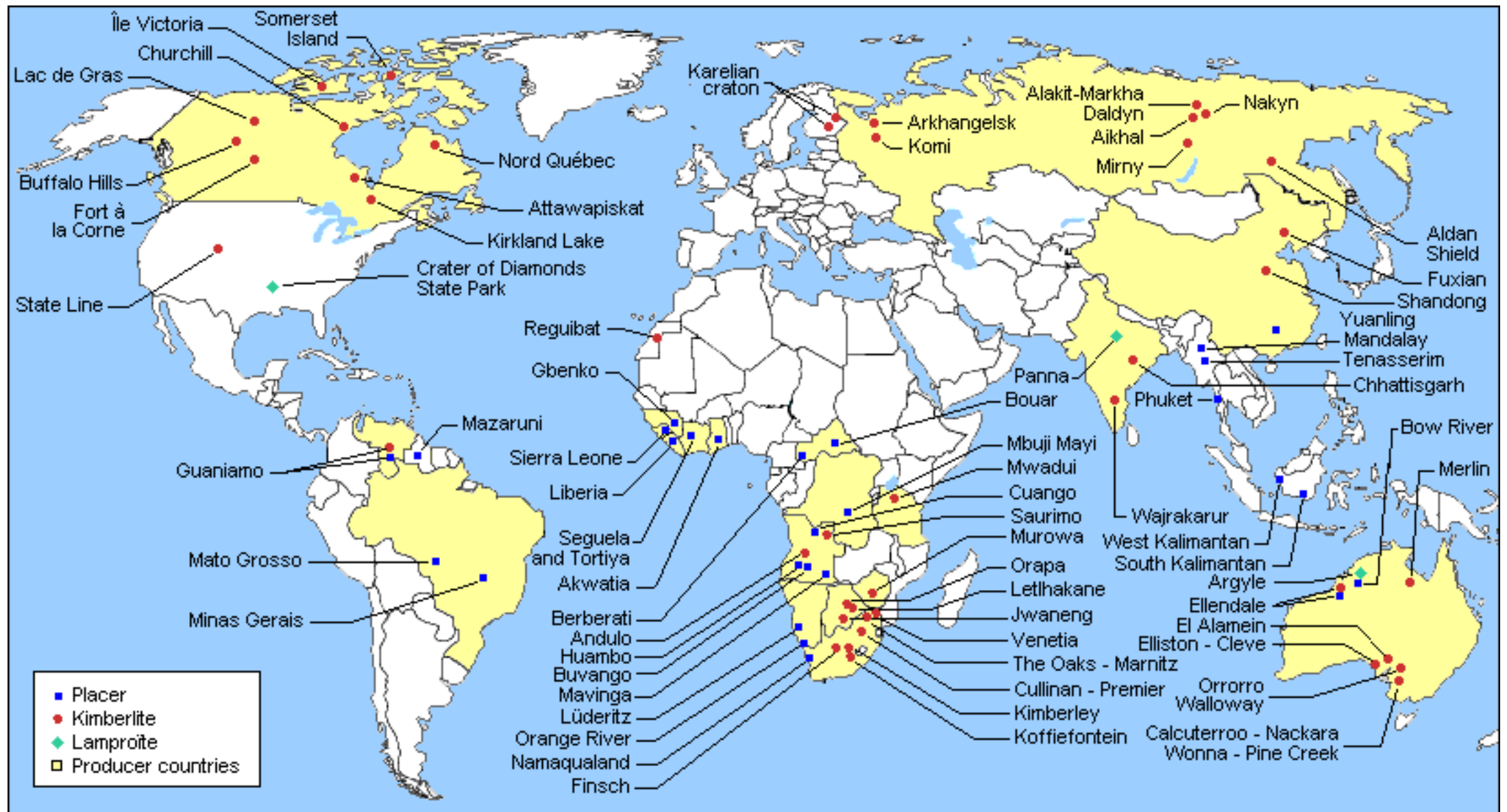
LOŽISKA DIAMANTŮ

DIAMANTONOSNÉ HORNINY	
Kimberlity	Lamproity
Diatremy (komínové brekcie v hloubkách, výše mohou přecházet do žil), někdy ukončeny na povrchu maarem, vzájemně se protínající, mohou tvořit shluky.	Převážně žilná nebo výlevná tělesa. Diatremy méně časté, širší a mělčí než kimberlity.
Kratony převážně archaického stáří.	Kratony archaického-mesozoického stáří.
Mg,K-ultramafické magma	K-ultramafické magma
úlomky pláště, silně metamorfovaných hornin, ultrabazik a ostatních hornin kůry a pláště	úlomky pláště, silně metamorfovaných hornin, ultrabazik a ostatních hornin kůry a pláště
olivín, flogopit, diopsid, enstatit, pyrop, ilmenit	leucit, flogopit, klinopyroxen, amfibol, olivín, sanidin
Kimberley (JAR), Mir (RU), Aikhal (RU) Ekati (CA)	Argyle (AU)

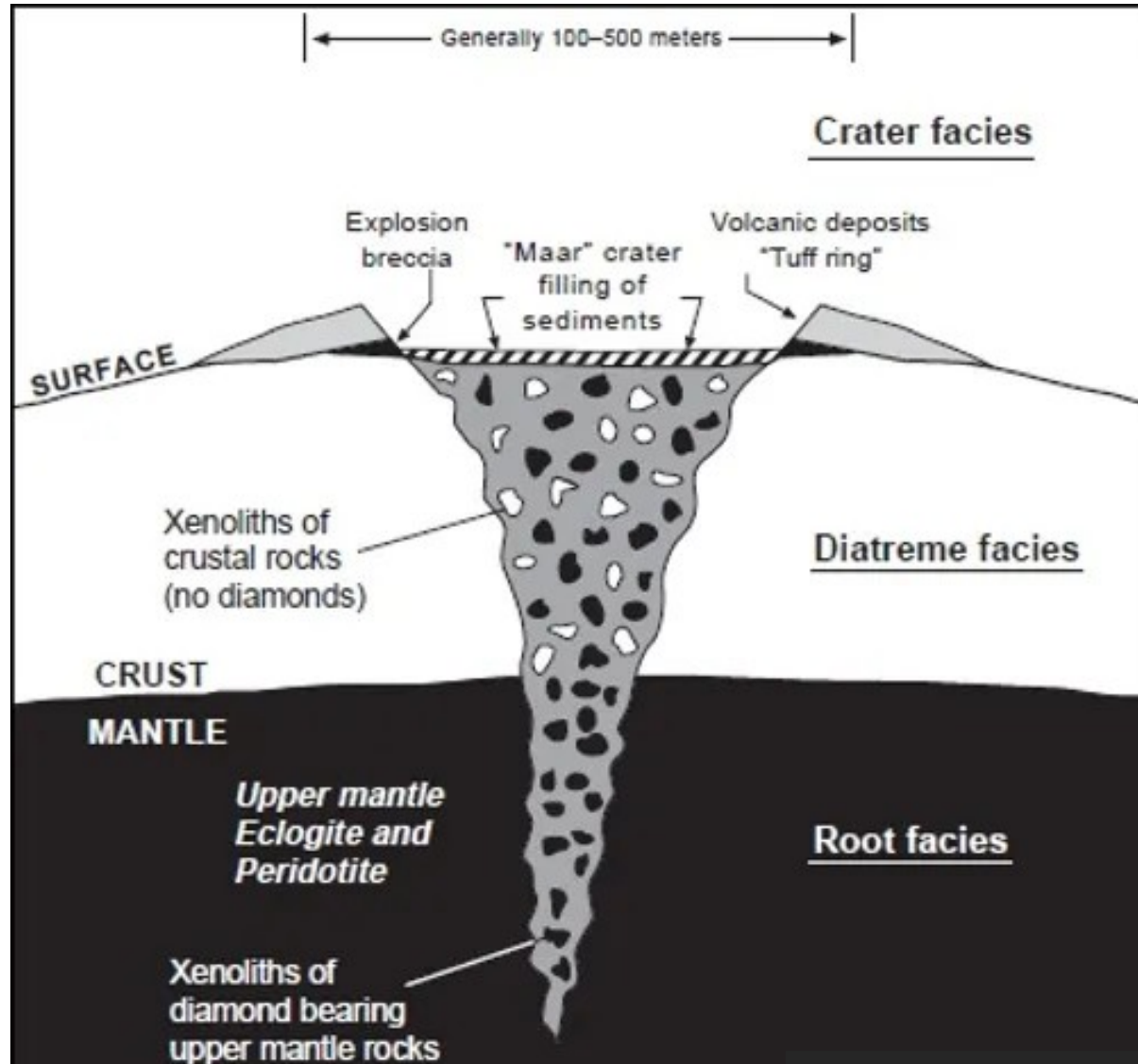
LOŽISKA DIAMANTŮ – ARCHAICKÉ KIMBERLITY



LOŽISKA DIAMANTŮ



LOŽISKA DIAMANTŮ

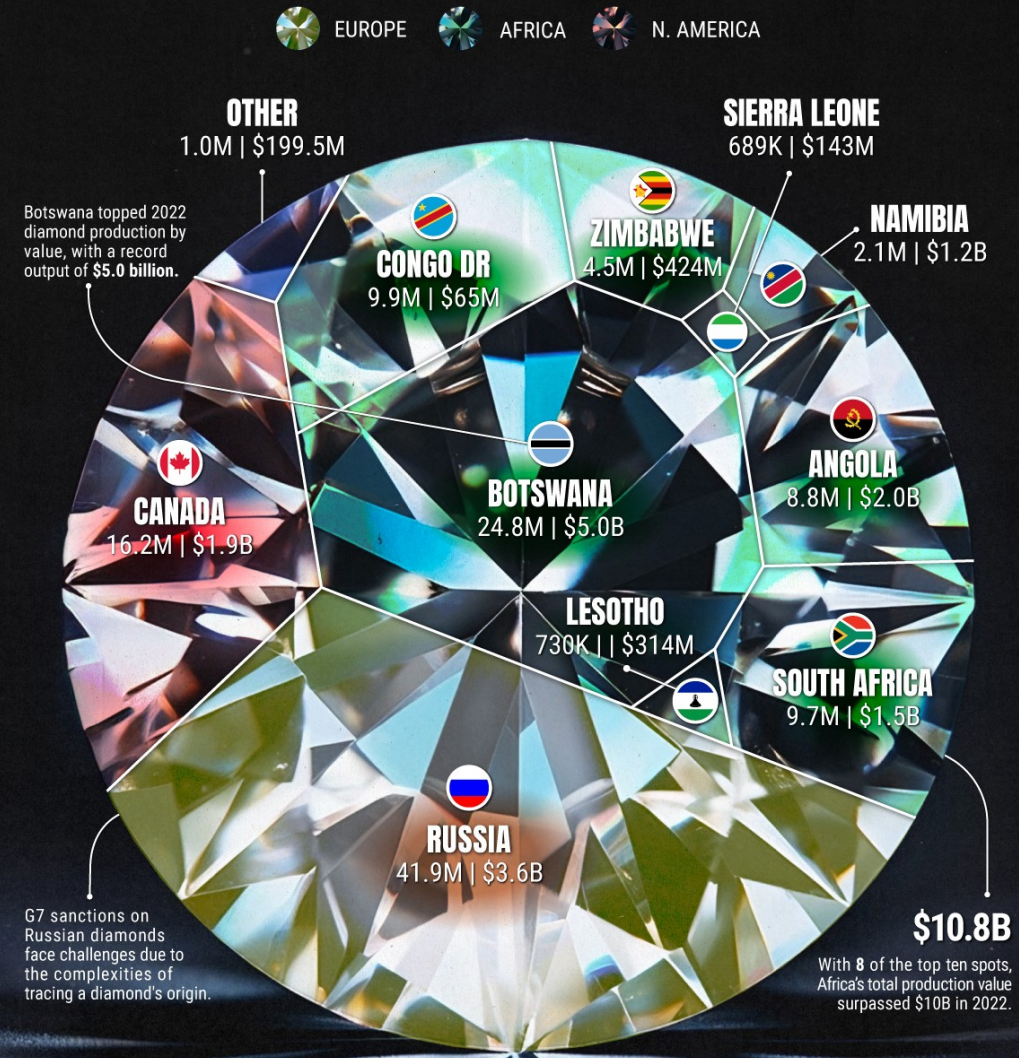


<https://www.geolstuffmnl.com/post/where-to-find-diamonds>

CARAT COLOSSI

THE 10 LARGEST DIAMOND PRODUCING COUNTRIES 2022*
in carats + \$ value

Which countries are the leading diamond producers annually? This chart presents data from the Kimberley Process Statistics, highlighting global diamond production and its monetary value for 2022.



*Mining production, figures are estimates by Dr. Ashok Damarupurshad
SOURCE: Kimberley Process Statistics and the Department of Mineral Resources and Energy (DMRE) for South African production.

LINHORKA



Pyroponosná (diamantonosná)
diatréma, Linhorka.

Přívodní dráha explozivního
vulkanismu vyplněná vulkanickou
brekcií s úlomky pyroponosných
peridotitů. V blízkém okolí byly
nalezeny tři (potvrzené) drobné
diamanty o velikosti max. 4 mm
(P. Pořádek)



HYSTEROMAGMATICKÁ LOŽISKA

HYSTEROMAGMATICKÁ LOŽISKA

- tzv. pozdně magmatická ložiska vznikla procesy **frakční krystalizace**, kdy ložiskotvorné minerály vykristalovaly později než horninotvorné
- uzavření zbytkové taveniny mezi zrny horninotvorných minerálů → vtroušeniny
- tektonicky neklidné prostředí = vytlačení taveniny → tvorba epigenetické mineralizace (žíly, čočky v dislokacích)

HLAVNÍ MINERÁLY	
chromit	FeCr_2O_4
ilmenit	FeTiO_3
magnetit	Fe_3O_4
hematit	Fe_2O_3
apatit	$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$ (OH,F)
PGE, sulfidy	
TEXTURY	
vtroušeninová	
masivní	



Gabbro

Disseminated ore



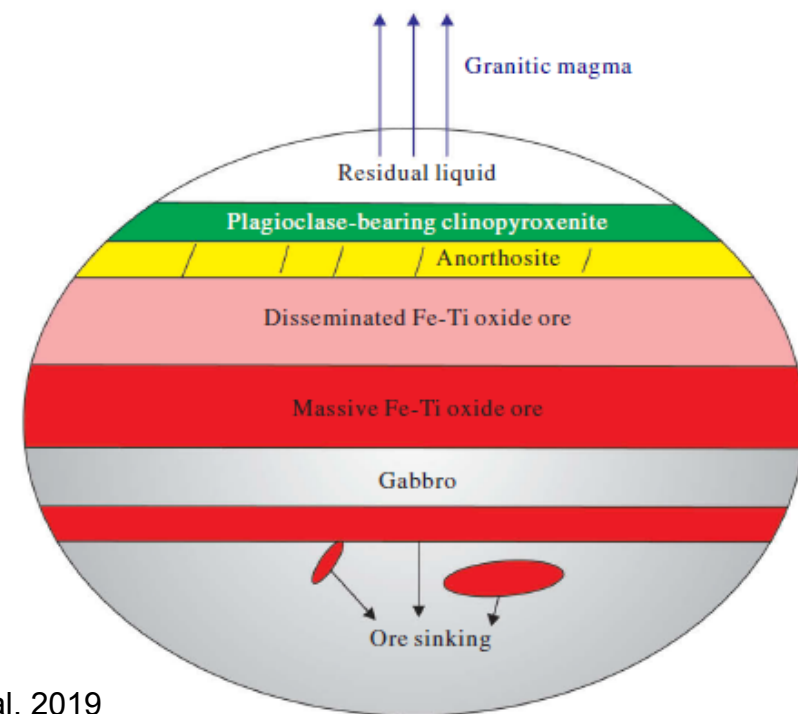
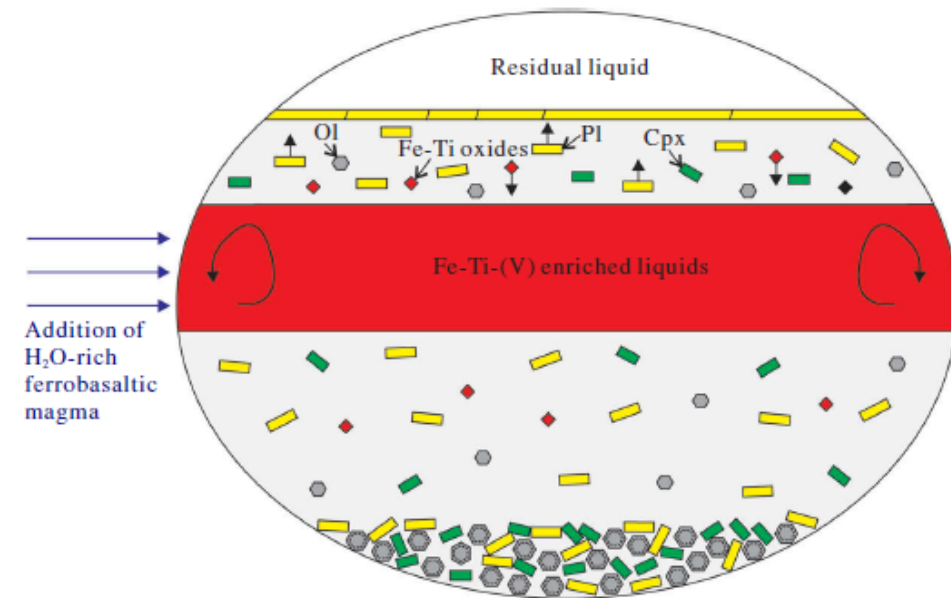
Olivine gabbro

Massive ore

Frakční krystalizací magmatu (gravitační diferenciacie) vznikla Fe-Ti-V-bohatá vrstva odmíšeniny s vysokou hustotou.

Piqiang mafic-ultramafic layered intrusion

Přínos H₂O podpořil krystalizaci Fe-Ti-V rud na úkor silikátů → vznik masivní a následně vtroušeninové mineralizace.

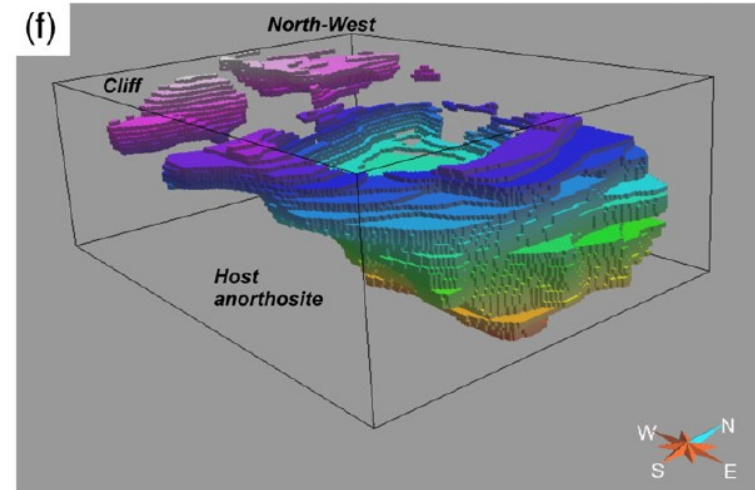
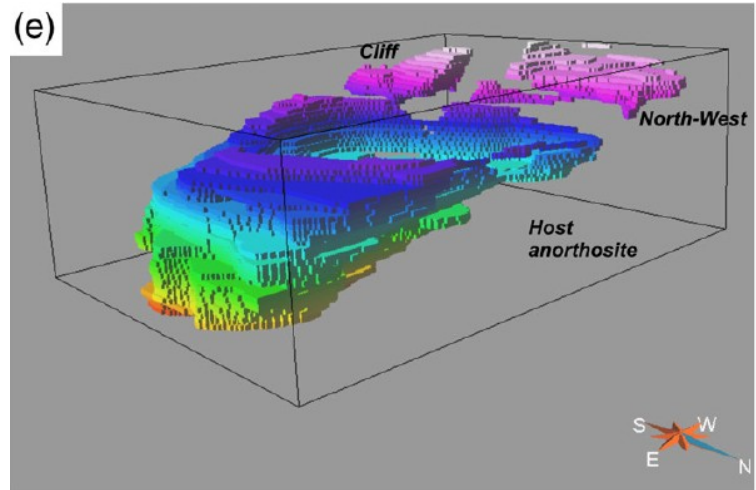
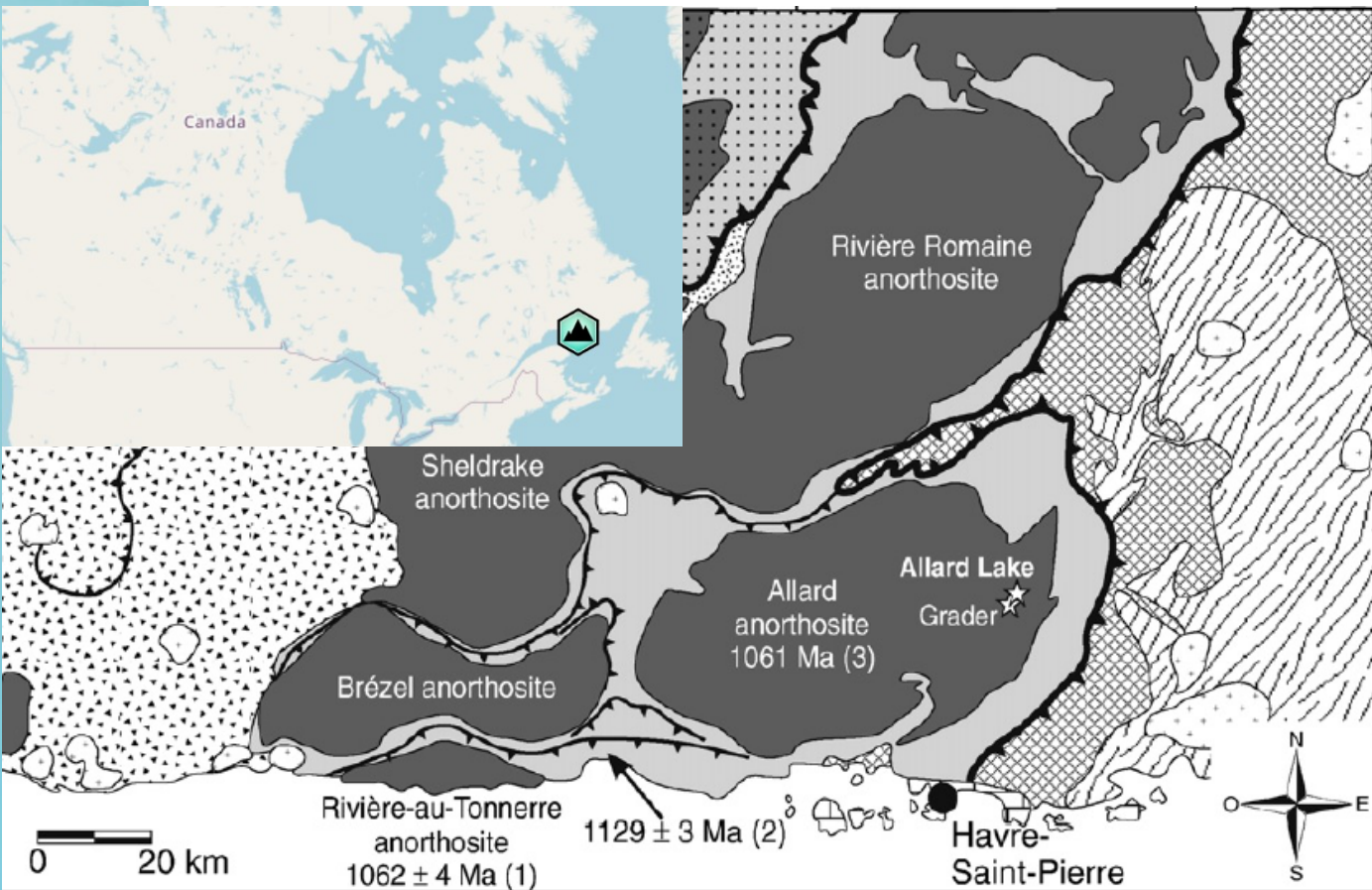


HYSTEROMAGMATICKÁ LOŽISKA

LOŽISKA		
Cr	Ural, Turecko, Nová Kaledonie, Filipíny	serpentizované peridotity
PGE	Ural	ultrabazika ofiolitových komplexů
Fe-Ti-V	Tellnes (NO), Lac Tio (CA)	anortozity
magnetit-apatitová formace	Kirunavaara	keratofyr (alkalickoživcový trachyt-andezit)
apatit-nefelinová formace	Kola (Kukisvumčorra, Jukspor a Koašva)	lopolit alkalických ultrabazik

LAC TIO (ALLARD LAKE DEPOSIT)

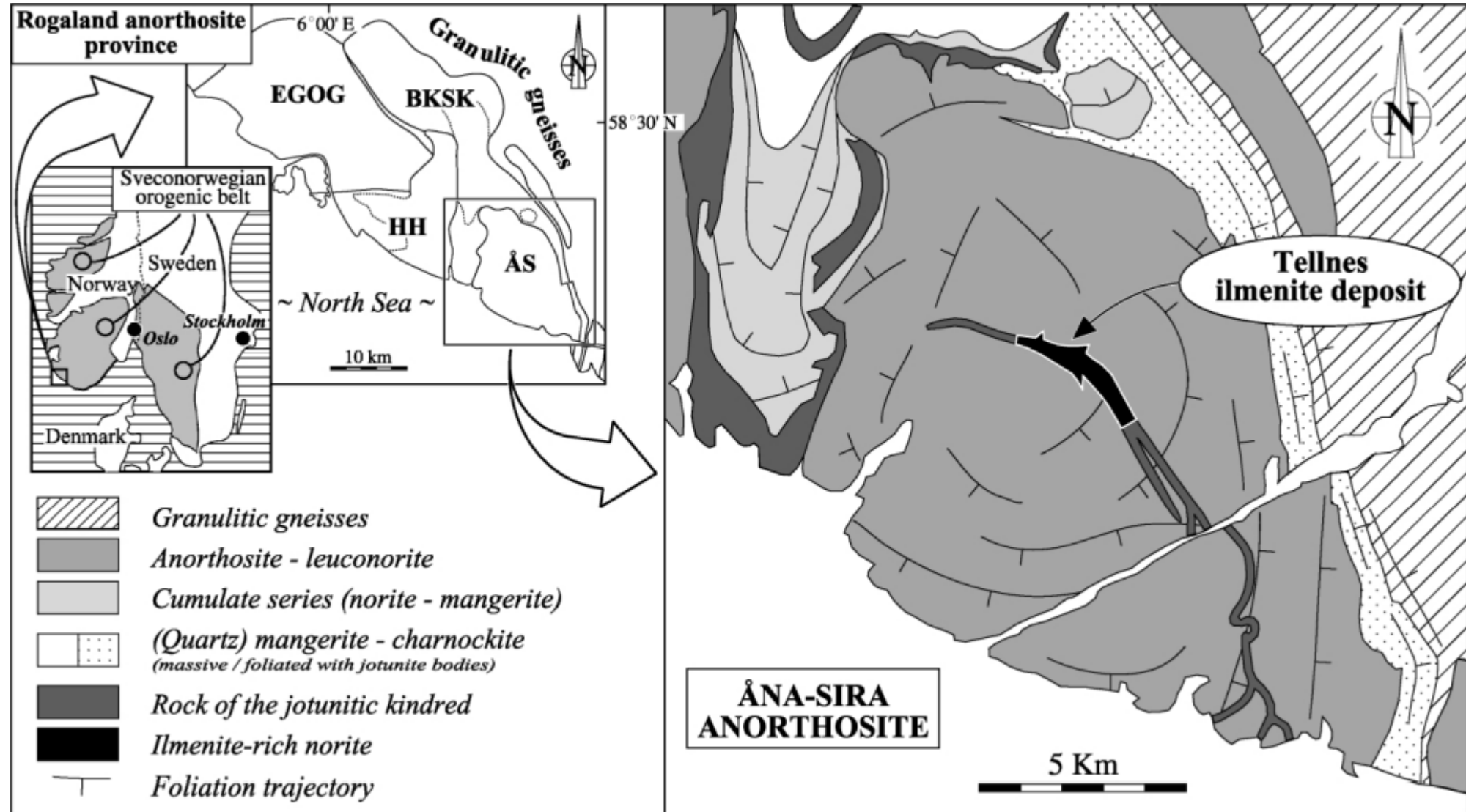
- největší magmatické ilmenitové ložisko na světě
- hematit-ilmenitový norit uložený v anortozitu
- hlavní rudní těleso → nálevkovitý tvar ca. 1 1 0.1-0.3 km (32-38 hm. % TiO₂)
- ilmenit, plagioklas, Al-spinel, orthopyroxen
- epizodické usazování magmatu střídající se s periodami frakční krystalizace a mísení magmatu → hybridní magma → periodická krystalizace hematitu-ilmenitu s či bez plagioklasu



TELLNES

- ilmenitový norit (18 hm. % TiO_2) uložený v anortozitu
- by-products → rutil, magnetit, Ni-Cu sulfidy
- rudní těleso → srpovitý tvar ca. 0.4-2.7 km → koncentrace TiO_2 se snižuje směrem do krajů tělesa
- plagioklas, orthopyroxen, olivín, Fe-Ti oxidy
- převažují procesy frakční krystalizace

TELLNES



KIRUNAVAARA



Ložisko magnetit-apatitové formace, Kiirunavaara.

Pohled na nejstarší část dolu, kde byla železná ruda těžena z povrchu (open-pit). Povrchová těžba zde byla přibližně do 60. let 20. stol (P. Pořádek)



KARBONATITY

KARBONATITY

REE (LREE), P, Nb-

Ta

- karbonatit = karbonátová hornina tvořená více než 50 % primárními karbonáty, obvykle i více než 90 % a zároveň méně než 20 % SiO_2
- nejčastěji součást alkalických ultramafických-ultrabazických intruzivních komplexů, ale mohou pronikat i fenitizovanými granity
- zdroj karbonátů – metamorf. fluida, **subdukce oceánské kůry**
- proterozoikum – recent

VZNIK KARBONATITŮ

rychlý výstup ultrabazického magmatu



vznik alkalických hornin

↓ metasomatóza-fenitizace ↓

KARBONATIT – finální diferenciat ultramafického alkalického magmatu



alkalické žíly

TVAR TĚLESA

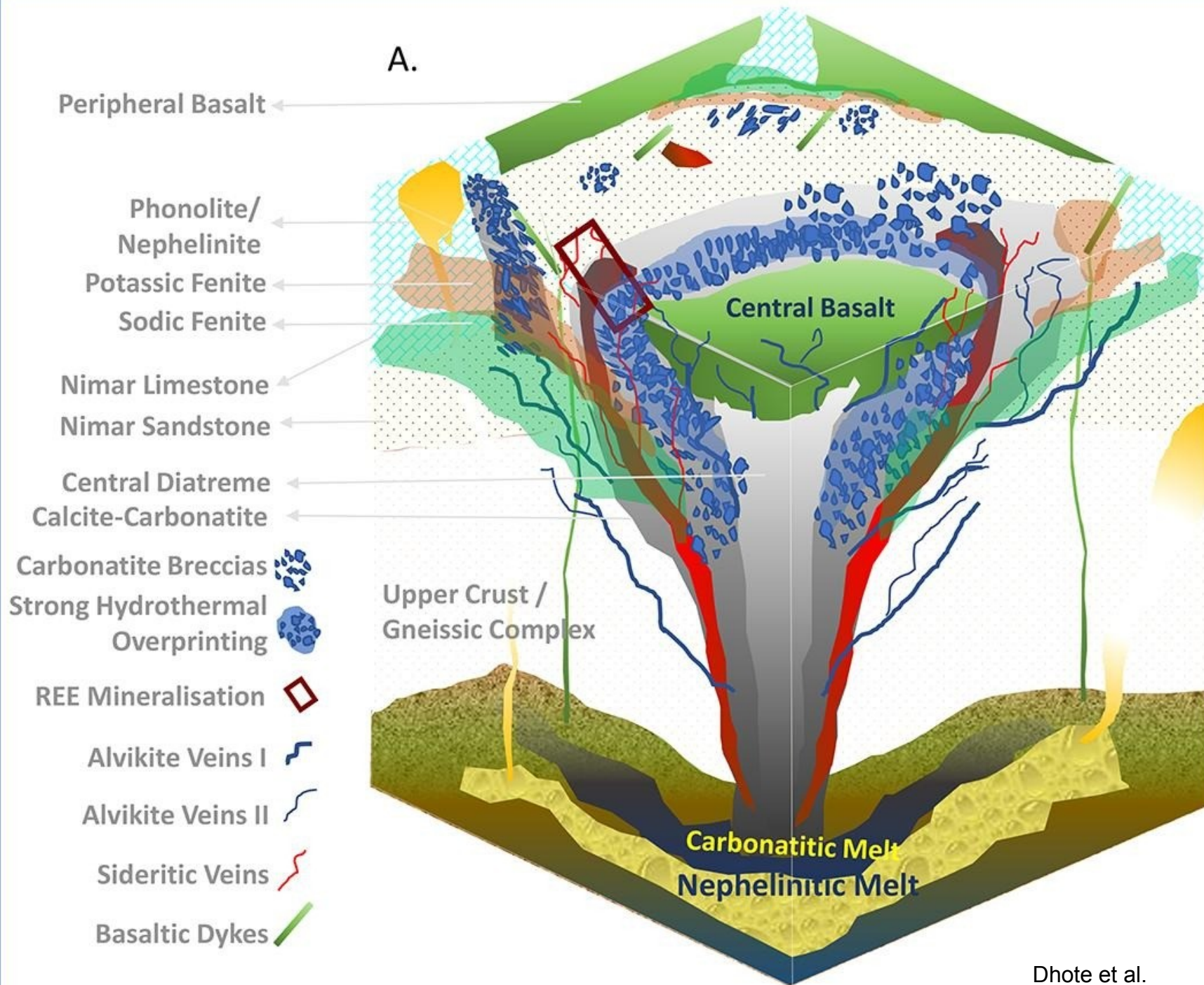
Centrální pně s výraznou koncentrickou stavbou nebo žilné výplně vulkanogenních struktur.

Komínové intruze kónického-válcovitého tvaru mohou mít hloubku i více než 15 km.

KARBONATITY LZE ROZDĚLIT NA 3 TYPY

PRIMÁRNÍ MAGMATICKÝ	HYDROTERMÁLNÍ	ZVĚTRALINOVÝ
mineralizace již v pozdní magmatické fázi	mineralizace vzniklá působením hydrotermálních fluid odmíšených z magmatu	mineralizace vzniklá v důsledku dlouhotrvajícího zvětrávání a vyluhování fluidy
charakteristickým znak → mineralizace celého tělesa	hydrotermální fluida často přetiskují původní magmatickou mineralizaci	obvykle obohacen o HREE – LREE má vyšší mobilitu
čočkovitá tělesa, ohraničení hlubokými zlomy	žíly, žilníky, ohraničení hlubokými zlomy	lateritické kůry/krusty
zrudnění obvykle jemnozrnné, masivné, vtroušeninové či páskované	zrudnění obvykle ve formě žilné výplně, vtroušeninové či obrůstání primárních magmatických minerálů	REE zrudnění je remobilizováno, obohaceno a adsorbováno na povrchu jílových minerálů, typicky kaolinitu
bastnäsit, monazit, allanit, xenotim, parisit-(Ce,Nd), pyrochlor, magnetit, hematit, apatit, baryt, kalcit, dolomit	minerálně méně rozmanitý: bastnäsit a parisit, kalcit, baryt, fluorit, apatit, křemen	

KARBONATITY – GENERALIZOV ANÁ STAVBA



KARBONATITY

TEXTURY

vtroušeninová

pásky, zóny

LOŽISKA

Pallabora	Transvaal supergroup	JAR
Bayan Obo	severočínský kraton	CN
Mountain Pass	Mojave Crustal Province	USA
Araxá	SV okraj pánve Paraná	BR

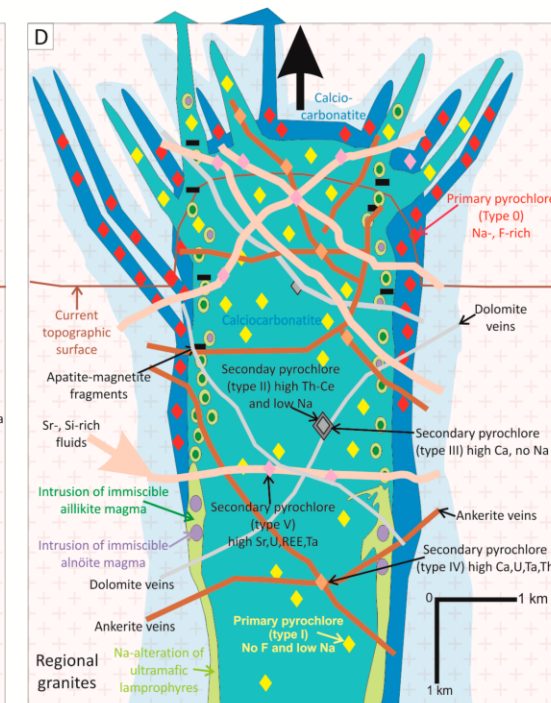
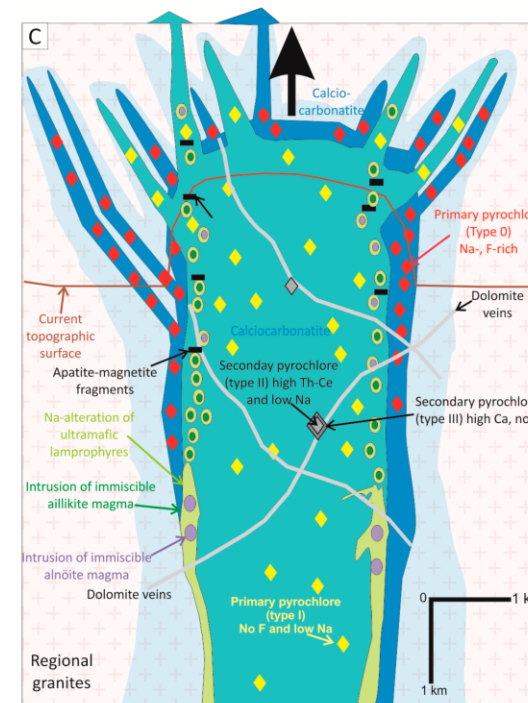
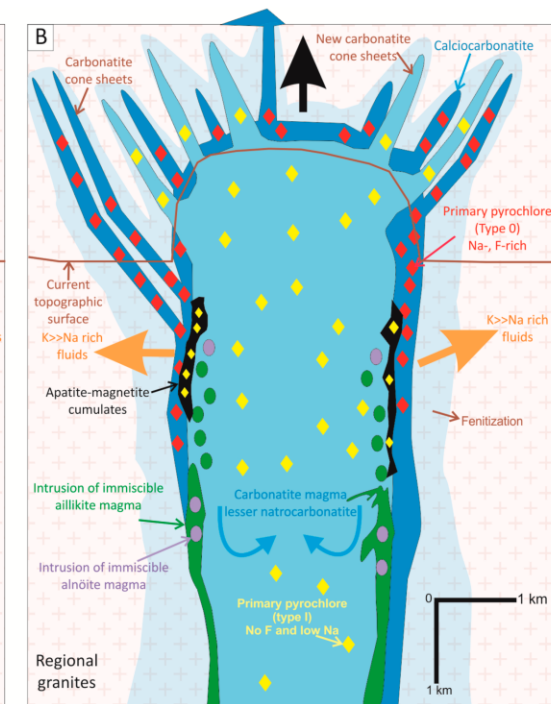
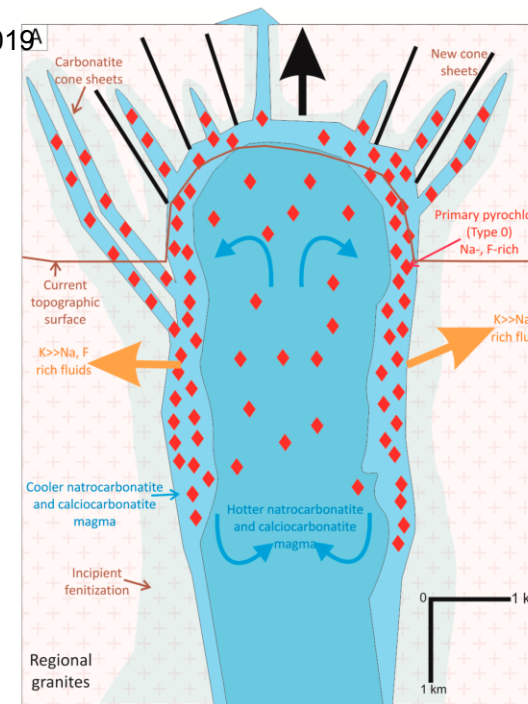
primární karbonáty

kalcit, dolomit, ankerit, siderit

ostatní minerály

apatit, magnetit, ilmenit, diopsid, augit, alkalický lamprophyres, pyroxen/amfibol/živec, flogopit, biotit

U, Th, Zr, Fe, Ti, V, Zn, Mo, Cu, Mn, Pb, Ba

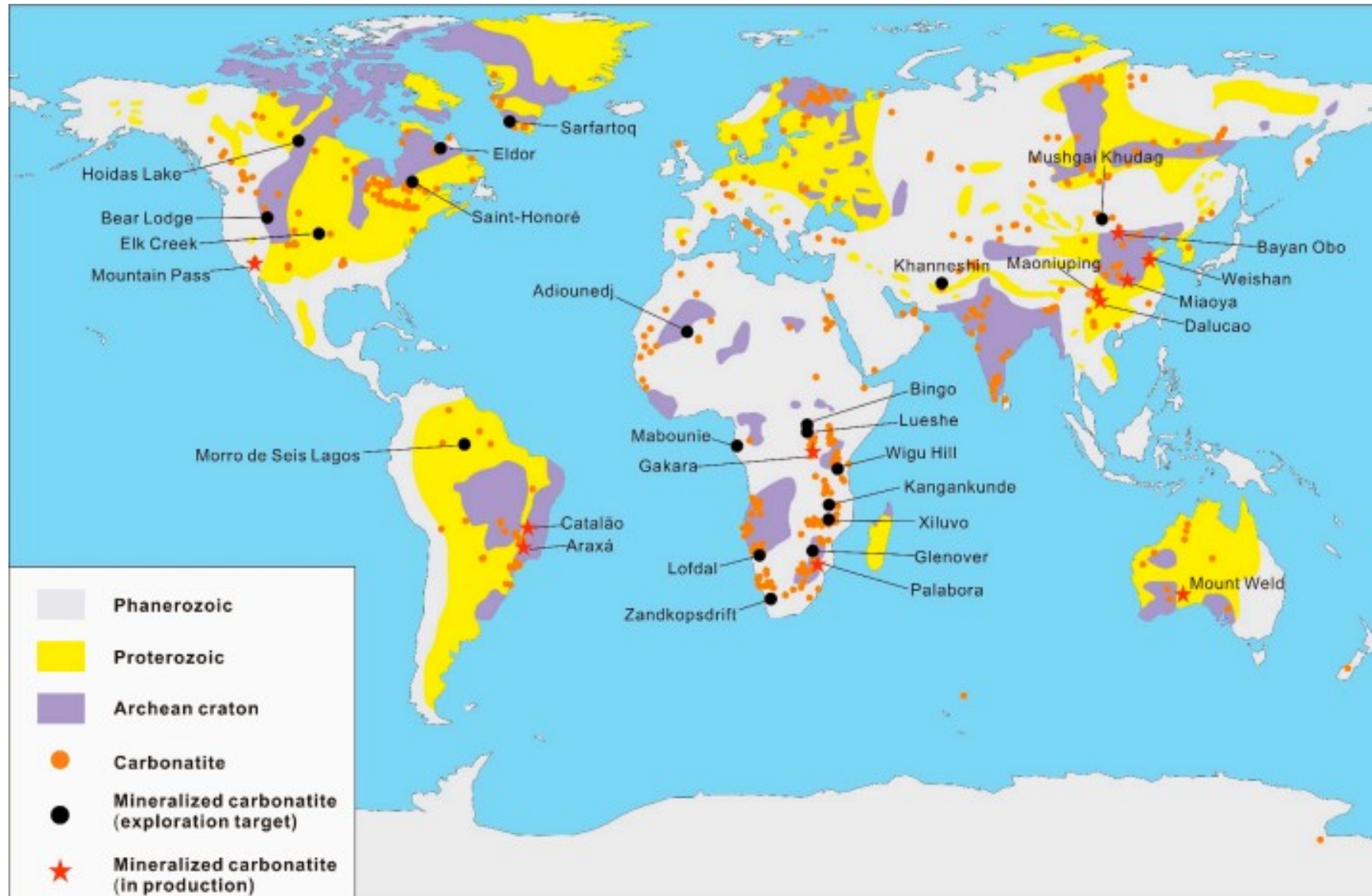


KARBONATITY - FENITIZACE

FENITIZACE
Si + Al vyloučeny do roztoku
K + Na + Ca + Fe zůstávají ve fenitu
Na,K-amfiboly, Na-pyroxeny, K-živec, albit, nefelín, tmavá slída
apatit, REE minerály – titanit, pyrochlor, monazit, bastnäsit



LOŽISKA KARBONATITŮ



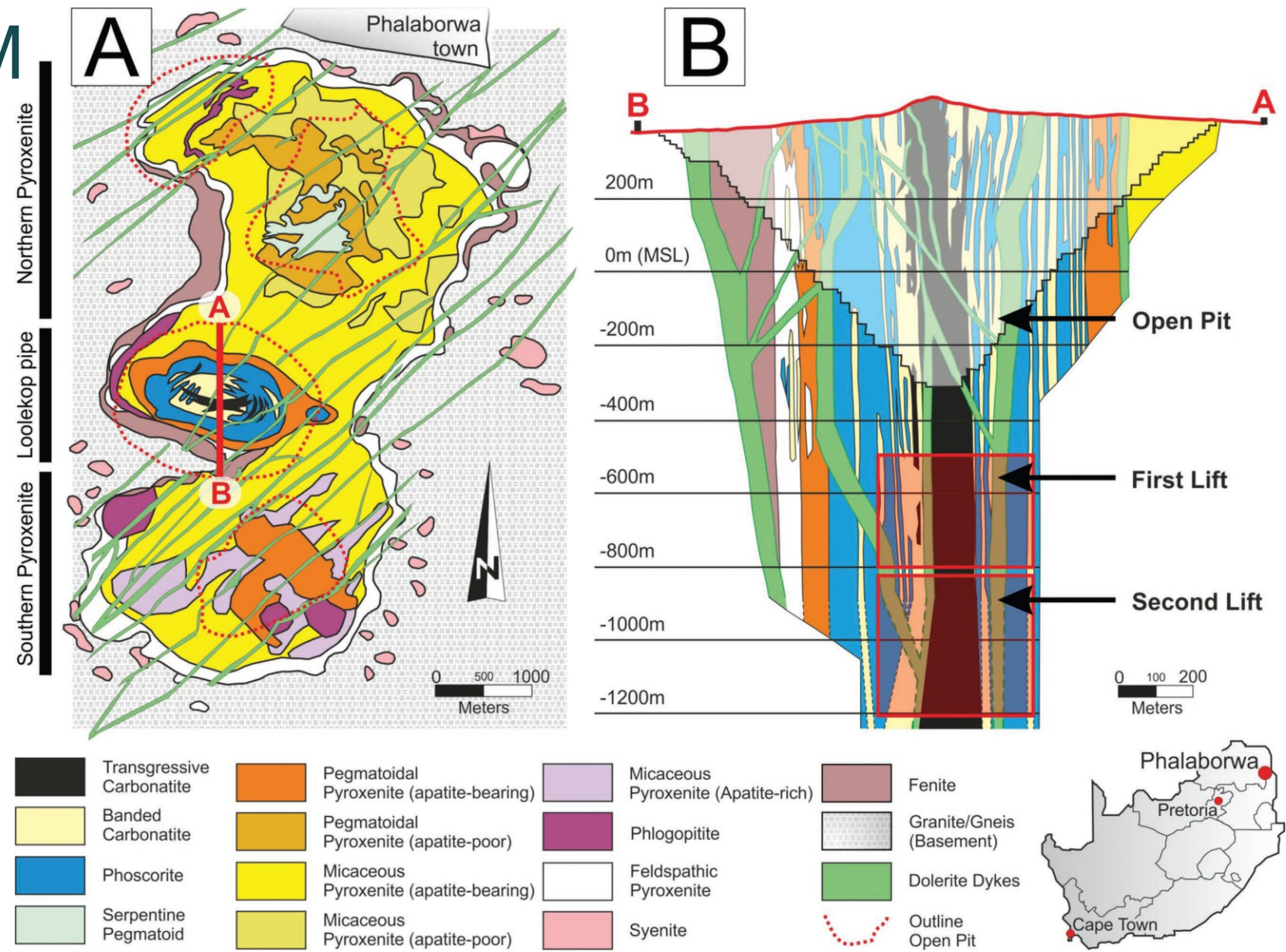
PALABORA

Cu, Co, Zr, Hf, Fe, vermikulit

- ložisko vázáno na proterozoický komplex výlevných hornin (**pyroxenit, foskorit, syenit, ultrabazické pegmatity**) vzniklý před 2.06 Ga ležící v SV Transvaalu archaického stáří
- chalkopyrit, kubanit, bornit, magnetit, apatit, vermikulit
- Au, Ag, U, Ni, PGE
- struktury masivní až vtroušeninové, čočkovité
- mineralizace Cu je vázána na karbonatitové jádro a foskority
- fosfáty jsou vázány na foskority a apatit-bohaté pyroxenity

PALABORA – ŘEZ LOŽISKEM

- komplex má ledvinitý tvar
- mineralizace je vázána na tzv. **Central Carbonatite**
- **Central Carbonatite** má koncentrickou stavbu do středu tvořenou pegmatitickým pyroxenite, foskoritem a karbonatitovým jádrem



MOUNTAIN PASS

LREE (Ce), Ba

- druhé největší ložisko REE na světě (16 mil. t zásob REE)
- karbonatit intrudoval do prekambričského metamorfního podloží
- rudní tělesa jsou ve formě ložních žil nebo čoček uložena v **Sulphide Queen** karbonatitu
- mineralizace → bastnäsit (10-15 hm. %), baryt, dolomit, kalcit



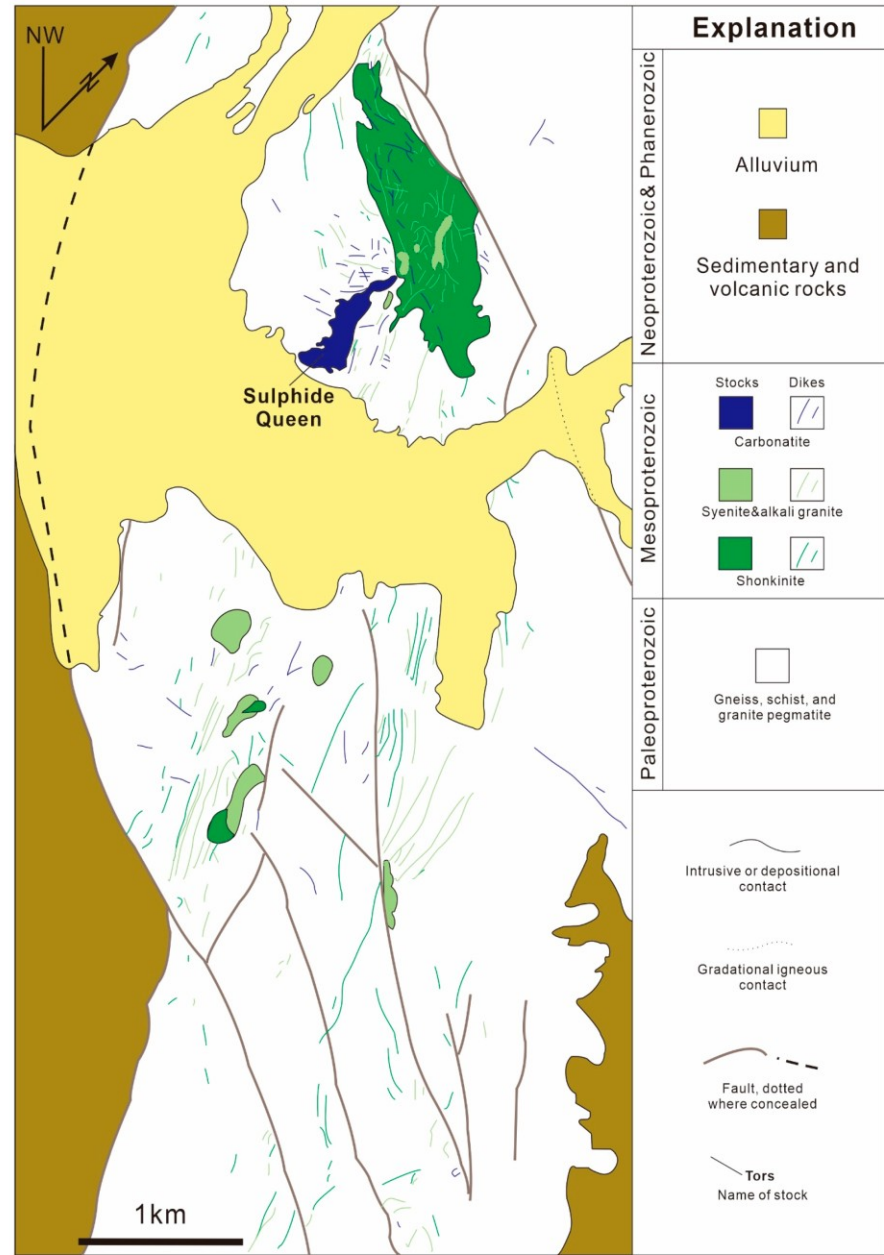
<https://www.mpmaterials.com/what-we-do/>

SULPHIDE QUEEN CARBONATITE

NEOBVYKLÝ KARBONATIT		
HORNINY	ultra-potasické horniny shoshonit, syenit, granit	alkalické horniny (Na) fenit, syenit, trachyt
TVAR TĚLESA	tabulární	koncentrická stavba
MINERALIZACE	LREE, Ba, ocuzení o Nb	LREE, Nb, Ta, Zr, P

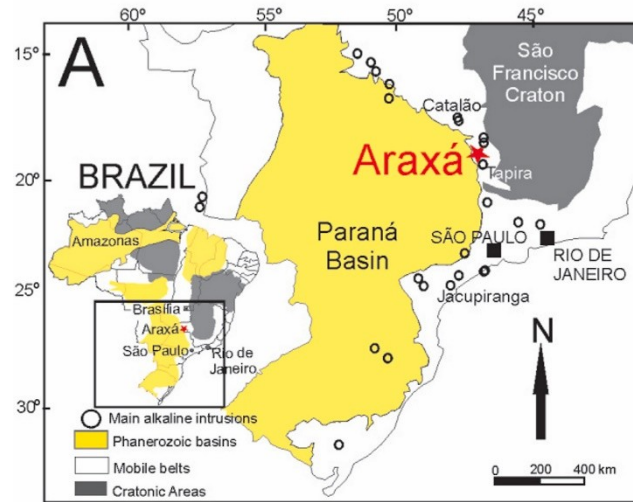


<https://www.usgs.gov/media/images/mountain-pass-rare-earth-element-mine-california>



ARAXÁ Nb-P-REE-Ti

- největší ložisko Nb na světě
- kruhovitá intruze s průměrem 4.5 km uložená v mezo-ptz fenitizovaných kvarcitech a břidlicích
- klasická koncentrická ringová struktura: dolomitický karbonatit → svor → kvarcit
- mineralizace: monazit, apatit, pyrochlor-Nb, magnetit dolomit, kalcit, ankerit, slída, perovskit
- vysoce kvalitní Nb asociován s foskorigy
- ložisko je silně zvětralé a obsahuje mocnou lateritickou vrstvu s



Cretaceous

- ▲ Kimberlite and kamafugite intrusions

Araxá alkaline Complex
Carbonatite, coarse grained phlogopitite and minor, fine-grained lamprophyre, inside a phenite halo.

Proterozoic

Ibiá Group

Rio Verde Formation

□ Muscovite-quartz schist interlayered with muscovite-chlorite schist and quartzite

Canastra Group

■ Quartzite and mica-rich quartzite interlayered with quartz schist, muscovite schist and sericite phyllite.
■ Minor garnet-muscovite schist

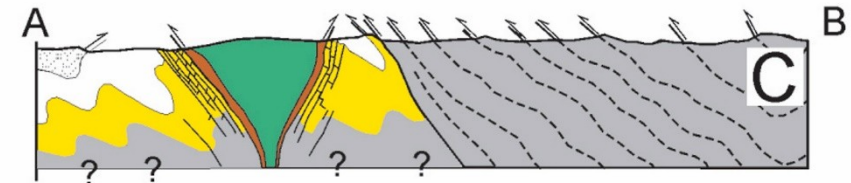
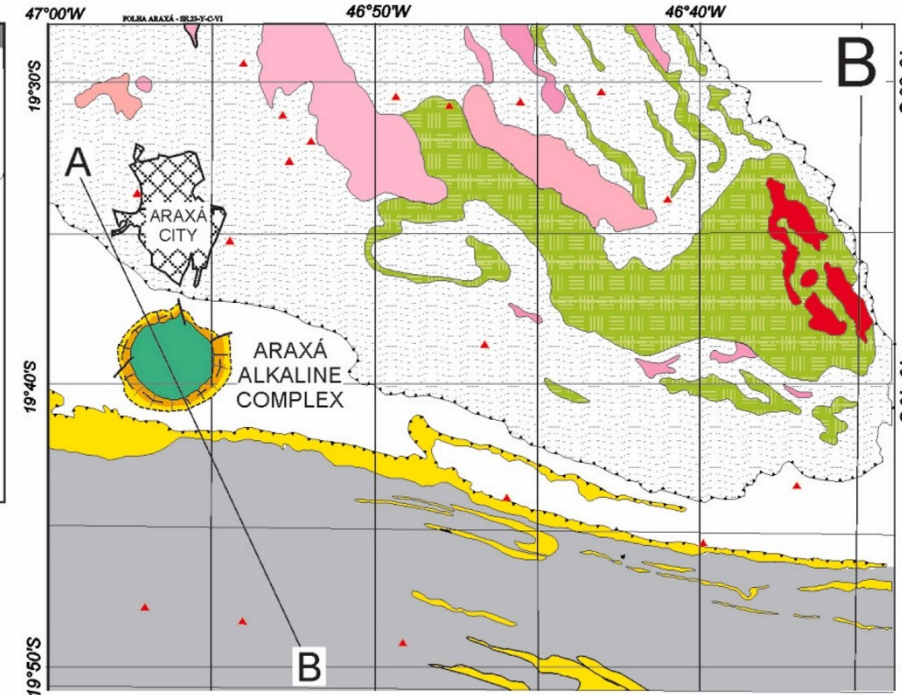
Araxá Group

■ Mainly garnet-muscovite-biotite-quartz schist, interlayered with muscovite-biotite-quartz schist and quartzite

■ Mainly amphibolite and minor chlorite-actinolite-schist, amphibole schist, and garnet-amphibole schist

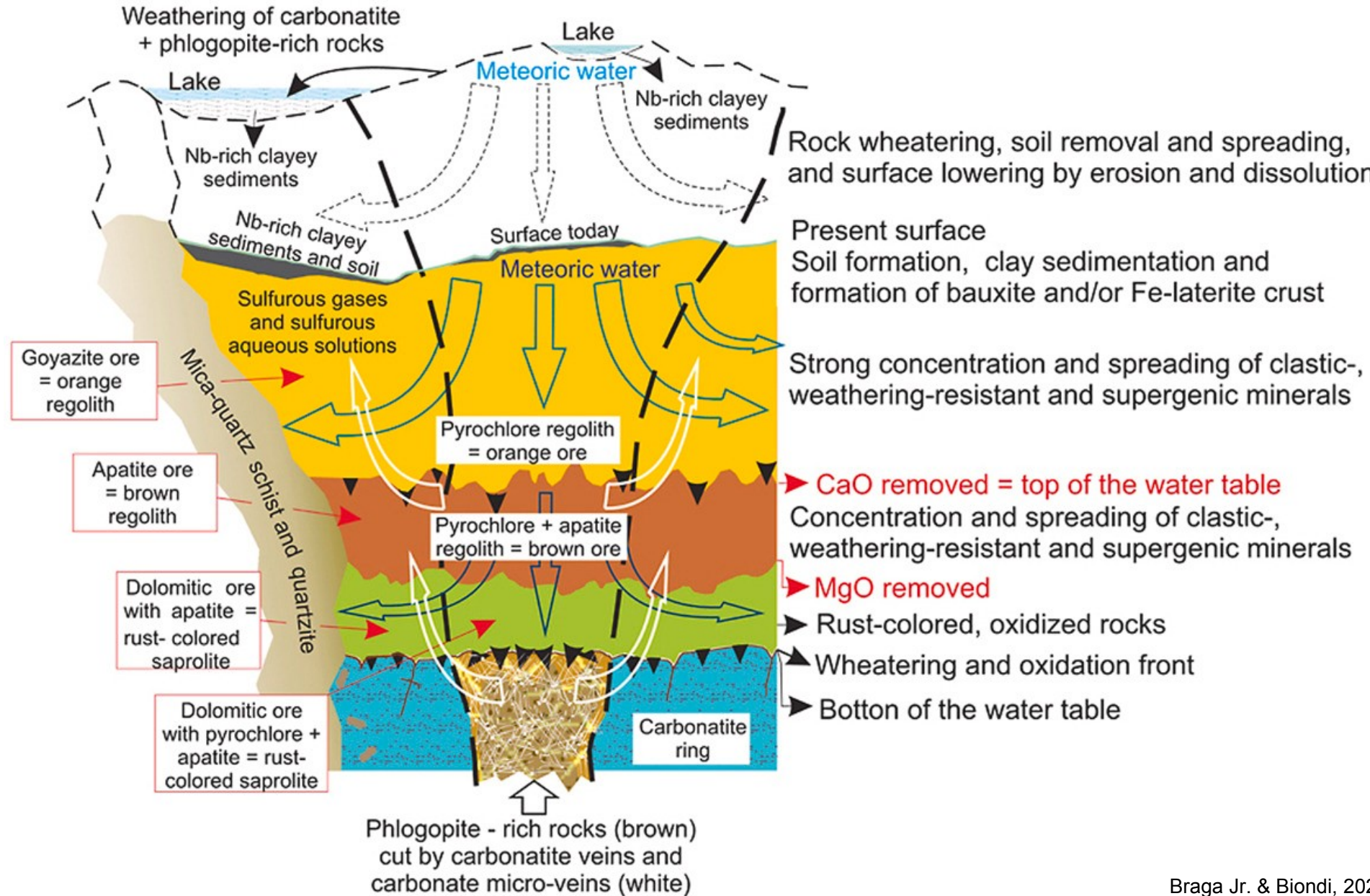
■ Granodiorite, monzogranite, and alkali-granite

■ Granite and alkali-granite



ARAXÁ – GEOLOGIC KÁ STAVBA

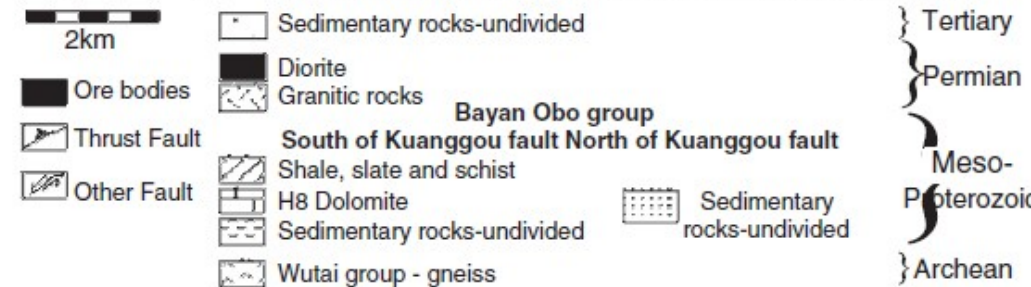
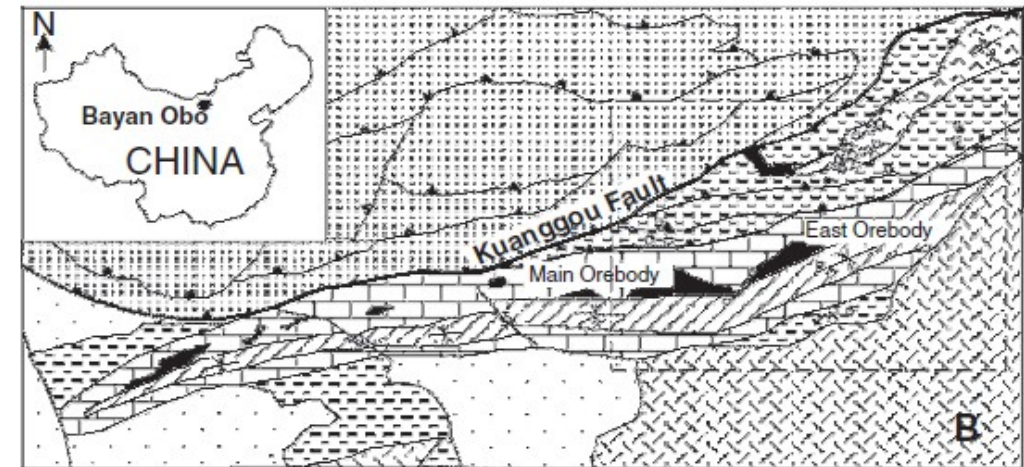
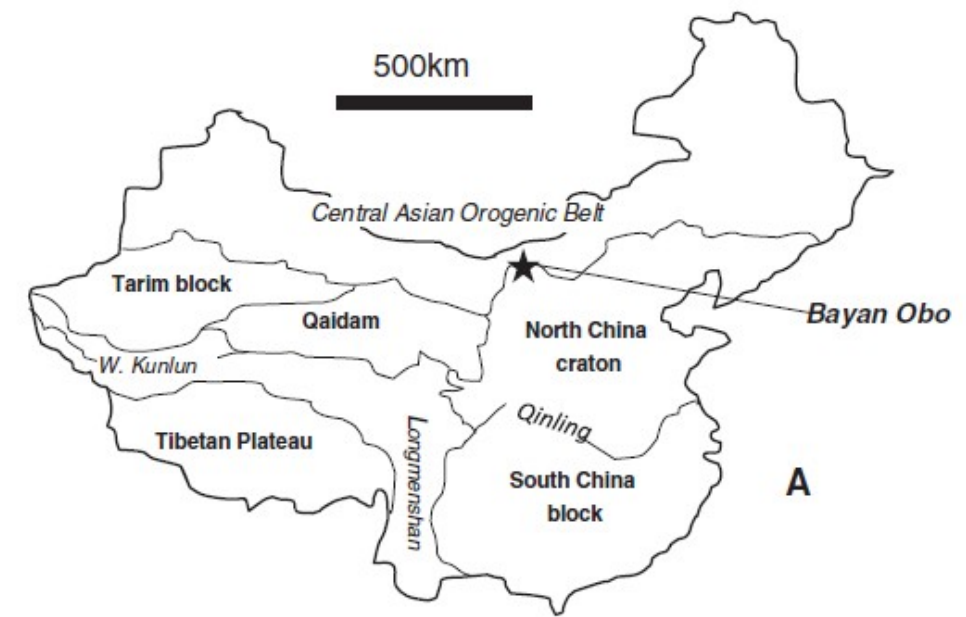
Araxá complex surface 90 - 70 Ma
Weathering of phlogopite-rich rocks with
carbonatite veins



BAYAN OBO

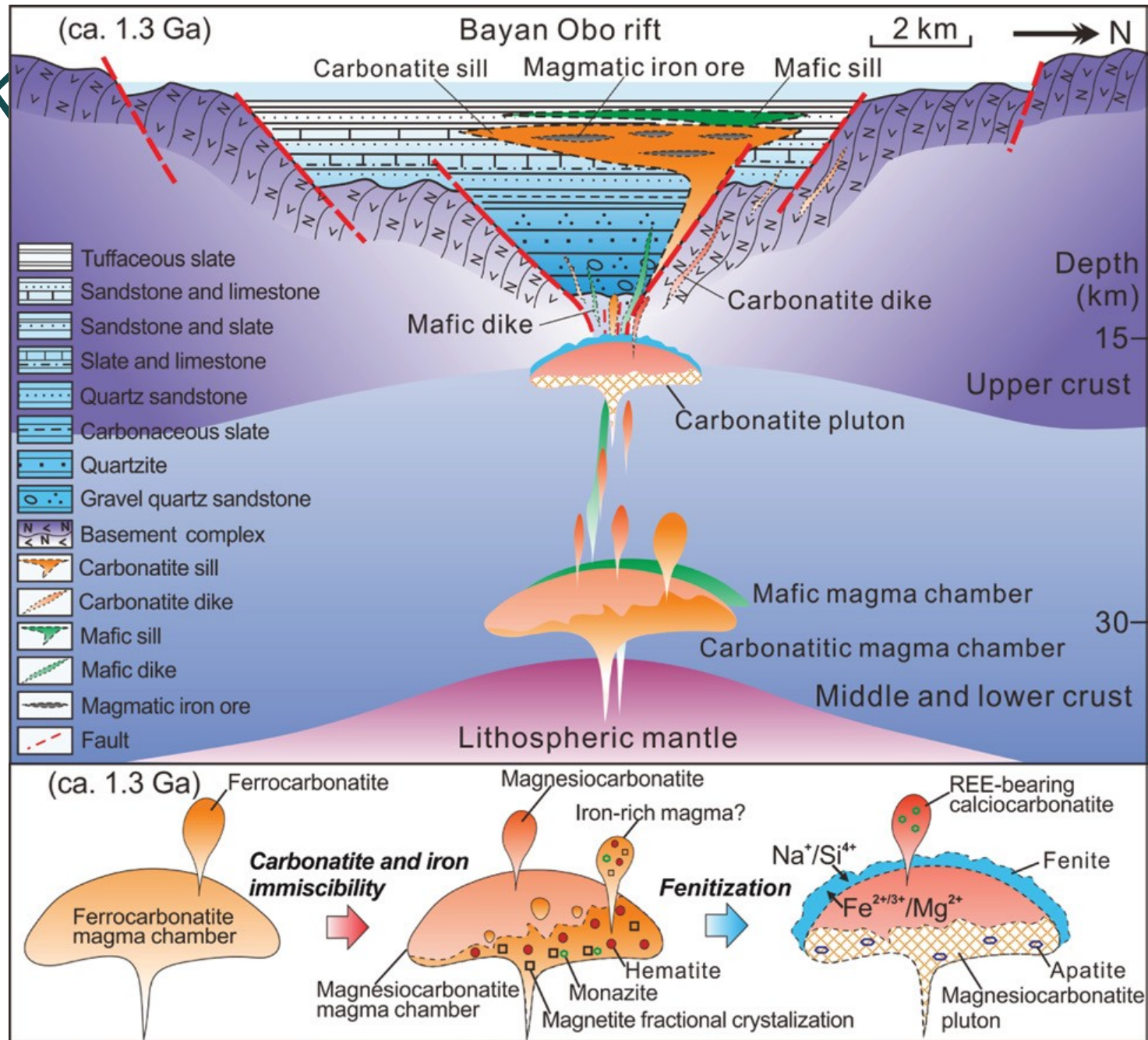
LREE, Fe, Nb, F

- ložisko vázáno na **dolomitické mramory** synklinály Bayan Obo proterozoického stáří
- **největší světové ložisko REE**
- jedná se o soustavu několika karbonatitových pňů → dolomitický (Fe), kalcit-dolomitický (Mg) a kalcitový (Ca) s největší koncentrací REE
- columbit, bastnaesit, monazit, pyrochlor, magnetit, hematit, fluorit

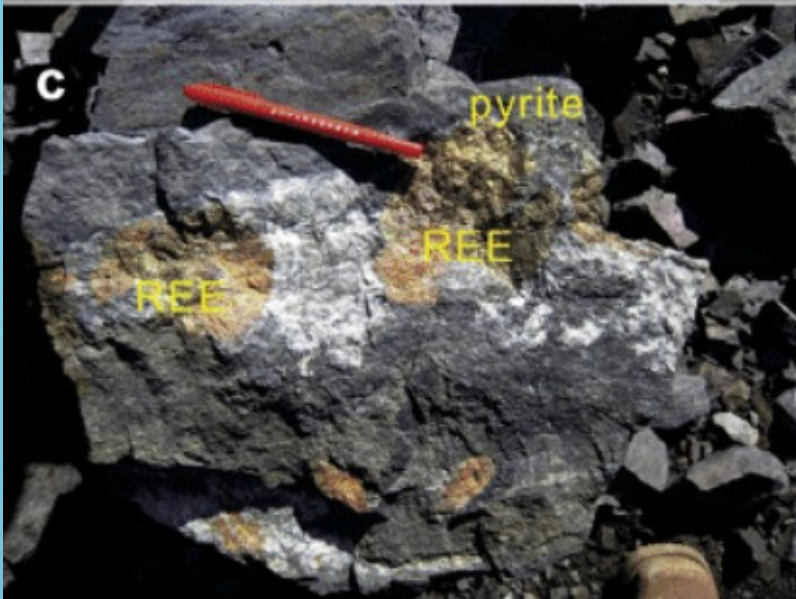
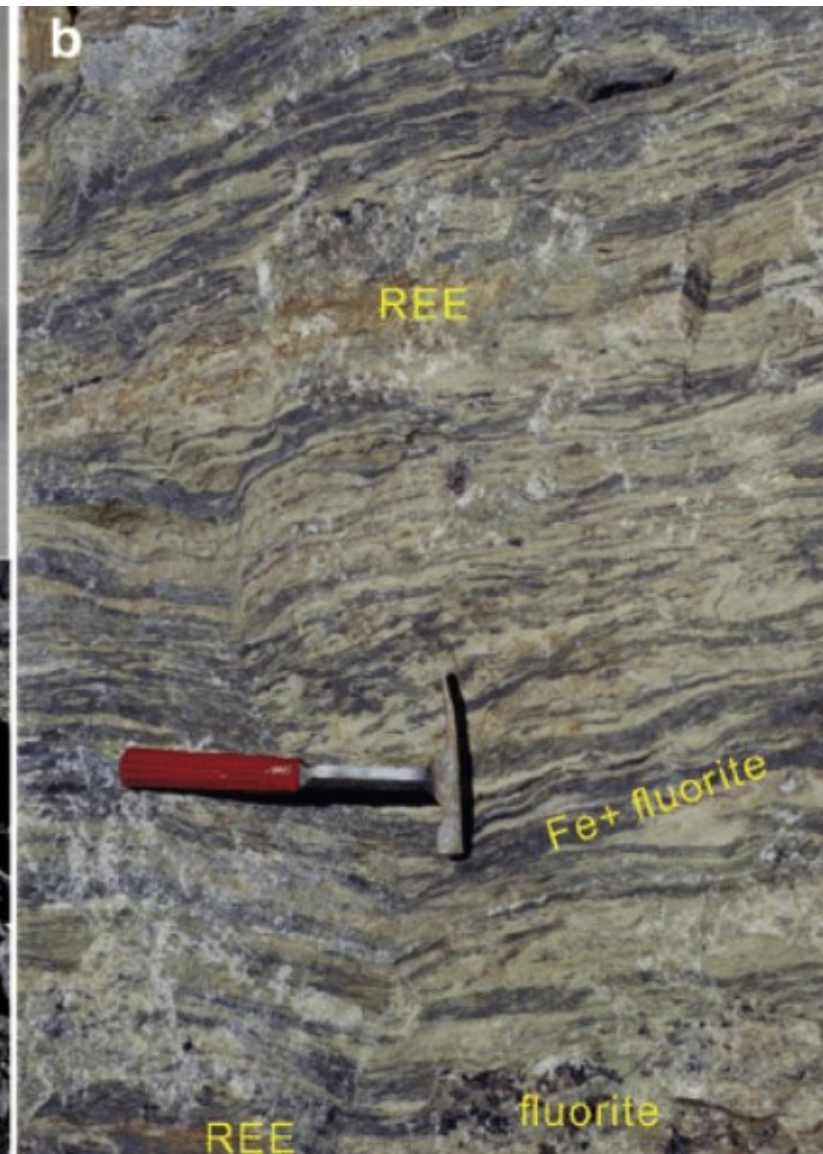


BAYAN OBO - VZNIK

- rozsáhlé hydrotermální alterace během pozdní etapy mineralizace
- extrémní REE obohacení vzniklo díky procesům intenzivní diferenciaci → transformace Fe-magmatu na Ca-magma + fenitizace



BAYAN OBO - HORNINY



(a) jemnozrnný dolomit s vtroušeninovou mineralizací

(b) páskovaná REE-Nb-Fe mineralizace

(c) pozdní žíla protínající páskovanou REE-Nb-Fe rudu