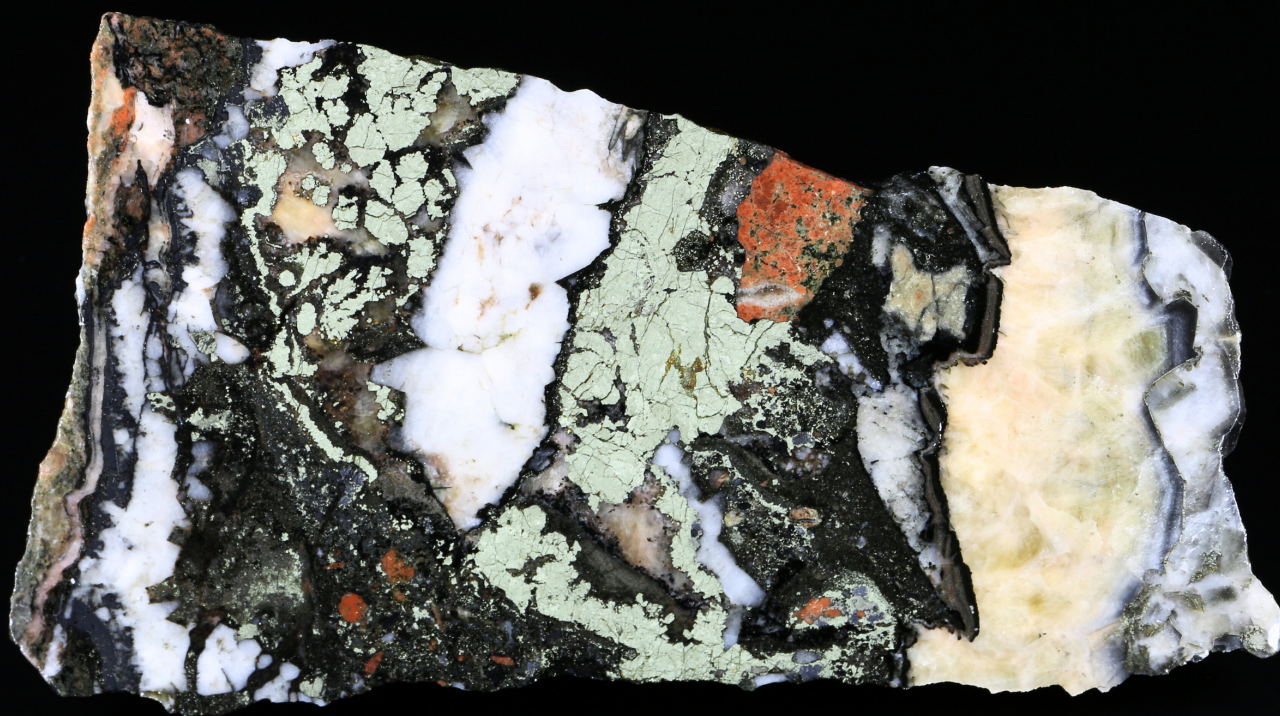


# URANOVÝ CYKLUS

OD VZNIKU LOŽISEK URANU AŽ PO HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ  
VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

VÝUKOVÁ SKRIPTA

Martin Kubeš & Vojtěch Wertich



ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD

MASARYKOVA UNIVERZITA

Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání radioaktivního odpadu

CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008459



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



# URANOVÝ CYKLUS

OD VZNIKU LOŽISEK URANU AŽ PO HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ  
VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

MUNI  
PRESS

MUNI  
SCI

Výuková skripta vznikla za podpory projektu

**Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání radioaktivního odpadu,  
reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008459.**



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



© 2023 Masarykova univerzita

ISBN 978-80-280-0321-0

ISBN 978-80-280-0322-7 (on-line ; pdf)

# URANOVÝ CYKLUS

**OD VZNIKU LOŽISEK URANU AŽ PO HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ  
VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA**

Výuková skripta

## **Autoři**

Mgr. Martin Kubeš, Ph.D.

Mgr. Vojtěch Wertich, Ph.D.

**Masarykova univerzita**

**Brno 2023**

# Obsah

<b>Předmluva .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Chování uranu v přírodě .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Mechanismus vzniku uranových ložisek .....</b>	<b>9</b>
2.1 Charakter a složení zdroje uranu.....	9
2.2 Vyvázání a mobilizace uranu ze zdroje.....	12
2.3 Schopnost hydrotermálních fluid mobilizovat uran .....	16
2.4 Akumulace uranu v horninovém prostředí .....	18
<b>3. Klasifikace a diverzita uranových ložisek .....</b>	<b>20</b>
3.1 Magmatická ložiska .....	22
3.1.1 Frakční krystalizace.....	22
3.1.2 Parciální tavení .....	23
3.2 Hydrotermální ložiska.....	23
3.2.1 Hydrotermální metasomatická ložiska .....	24
3.2.2 Hydrotermální granitická ložiska .....	25
3.2.3 Hydrotermální vulkanická ložiska .....	26
3.2.4 Hydrotermální diagenetická ložiska .....	27
3.2.5 Hydrotermální metamorfovaná ložiska.....	28
3.3 Infiltrační ložiska .....	28
3.4 Syn-sedimentární ložiska .....	30
3.4.1 Mechanické třídění.....	30
3.4.2 Redoxní zachycení .....	31
3.4.3 Redox-chemogenní ložiska .....	31
❖ Zajímavost .....	31
3.5 Ostatní .....	32
<b>4. Průzkum, těžba a využití uranu v ČR.....</b>	<b>33</b>
4.1 Etapy průzkumu ložisek uranových rud .....	33
4.1.1 První etapa – geologický výzkum.....	33
4.1.2 Druhá etapa – povrchový průzkum, mapování .....	34
4.1.3 Třetí etapa – vrtný průzkum .....	36
4.1.4 Čtvrtá etapa – průzkum pomocí důlních děl, studie proveditelnosti .....	37
4.1.5 Průzkum uranových ložisek – závěr.....	38
4.2 Těžba uranu na dnešním území ČR .....	40
4.3 Využití uranu na území ČR.....	41
<b>5. Koncept ukládání vyhořelého jaderného paliva.....</b>	<b>43</b>

5.1 Inženýrské bariéry .....	45
5.2 Geologické bariéry.....	46
<b>Literatura .....</b>	<b>48</b>

## Předmluva

Tato výuková skripta vznikla v průběhu řešení výzkumného multioborového projektu „Dlouhodobý výzkum geochemických bariér pro ukládání jaderného odpadu, reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008459“ (GeoBarr) a mají prohloubit znalosti a vědomosti studentů geologie bakalářského a navazujícího magisterského programu o tématech týkajících se chování uranu v geologickém prostředí, které bylo detailně studováno různými výzkumnými týmy v rámci Masarykovy univerzity. Cílem jednotlivých výzkumných skupin zahrnujících Ústav geologických věd, Ústav analytické chemie, Ústav fyziky Země a Geografický ústav bylo objasnit chování uranu v zemské kůře a získané poznatky implementovat za účelem predikce chování vyhořelého jaderného paliva uloženého v rámci hlubinného podzemního úložiště vysokoktivního radioaktivního odpadu. K objasnění těchto komplexních geologických procesů bylo využito **ložisko uranu Rožná**, vzniklé před zhruba 270 miliony let, jakožto přírodní analog vyhořelého jaderného paliva, které je podobně jako rudy uranu v ložisku tvořeno převážně  $UO_2$ .

V rámci řešení projektu byly rovněž získány zcela zásadní poznatky o mechanismech vzniku studovaného ložiska a okolním geologickém prostředí, které působilo jako **přírodní geochemická bariéra** bránící migraci uranu z prostředí ložiska do okolí. Samotný výzkum rovněž přispěl k pochopení a objasnění hlavních fyzikálně-chemických parametrů kontrolujících migraci uranu nebo naopak jeho zadržení v horninovém podloží, které hrají klíčovou roli při dlouhodobém ukládání vysokoaktivního vyhořelého jaderného paliva.

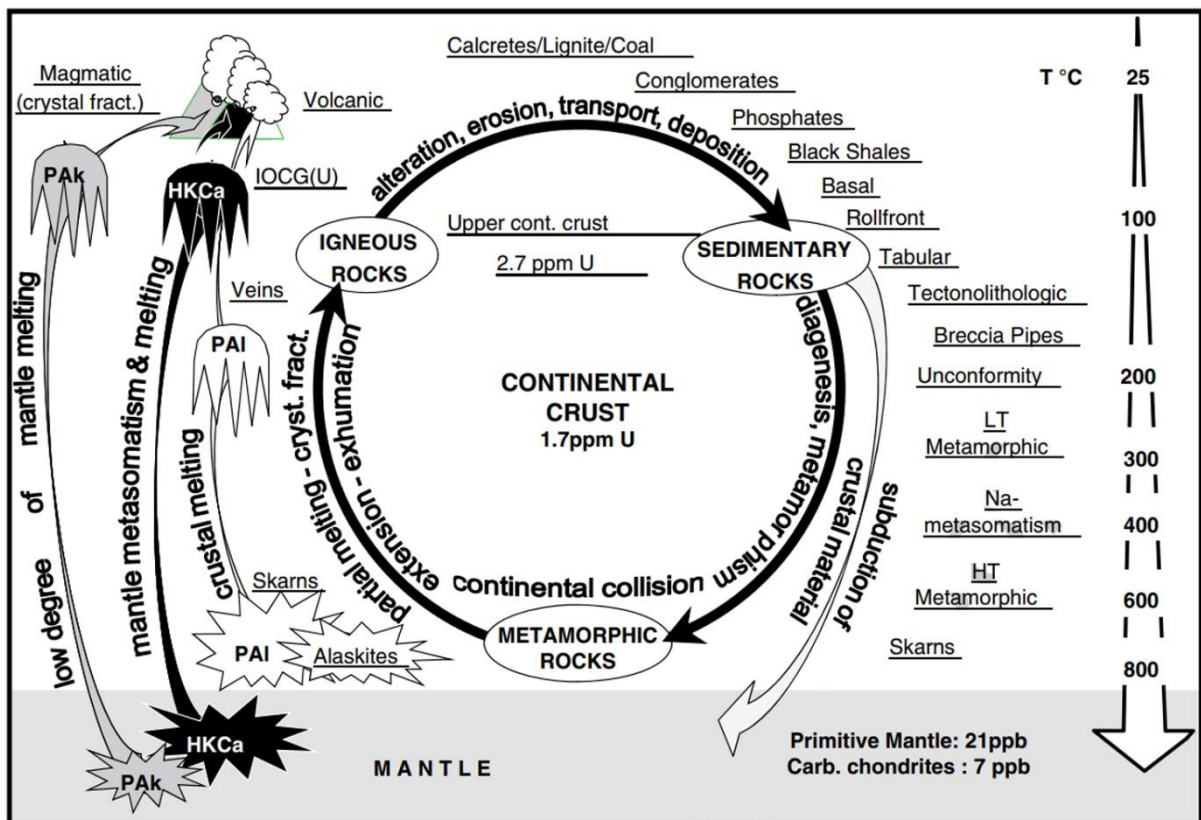
Studijní text v rámci výukových skript je systematicky uspořádán a postupně provádí čtenáře **celým uranovým cyklem** – od vzniku uranových ložisek přes těžbu a využívání uranové rudy až po samotnou realizaci hlubinného úložiště a nakládání s vyhořelým jaderným palivem. Ve výukových skriptech jsou rovněž zahrnuty kapitoly o základních mechanismech vzniku uranových ložisek a aktuální genetické klasifikaci rozdílných typů ložisek, uvádějící některé příklady významných světových a tuzemských ložisek uranu.



## 1. Chování uranu v přírodě

Uran je radioaktivní prvek patřící společně s thoriem do skupiny aktinidů a v přírodě je zastoupen v podobě 3 izotopů:  $^{238}\text{U}$  (99,2836 %),  $^{235}\text{U}$  (0,711 %) a  $^{234}\text{U}$  (0,0054 %). V přírodě se vyskytující nejstabilnější izotop  $^{238}\text{U}$  má zákonitě nejdelší poločas rozpadu  $4,46 \times 10^9$  let, tedy čas podobný stáří planety Země. Uran je v přírodním horninovém prostředí zastoupen ve 3 hlavních oxidačních stavech  $\text{U}^{4+}$ ,  $\text{U}^{5+}$  a  $\text{U}^{6+}$ , thorium se naopak vyskytuje pouze ve formě  $\text{Th}^{4+}$ . Charakteristickým rysem uranu je jeho inkompatibilní charakter daný velkým iontovým poloměrem a vysokou valencí – jedná se o typický znak většiny inkompatibilních prvků, které obvykle zahrnují tzv. high field strength elements (HFSE: Zr, Th, U, Nb, Ta, Ti) a rare earth elements (REE). S ohledem na jeho **inkompatibilní charakter** se uran zákonitě koncentruje ve více frakcionovaných taveninách a nevstupuje do krystalové struktury hlavních horninotvorných minerálů. Naopak jeho **hlavními nositeli v kontinentální kůře jsou akcesorické minerály** zahrnující například zirkon, apatit, monazit, xenotim, allanit a titanit. Kromě vazby na akcesorické minerály se uran v horninovém prostředí může vyskytovat ve formě vlastních fází (např. uraninit, uranothorit), adsorbovaných povlaků na jiných krystalech nebo organickém materiálu, případně je uran v jeho oxidované formě  $\text{U}^{6+}$  součástí hydrotermálních roztoků, mořské vody, fluidních inkluzí v rámci minerálů nebo v intersticiálních prostorech mezi dalšími minerálními fázemi.

Klíčovou roli při primárním zvyšování koncentrací uranu v přírodních podmínkách hrají zejména **magmatické procesy**. V důsledku parciálního tavení a frakční krystalizace bývá uran preferenčně frakcionován do silikátové taveniny, což má za následek postupný transfer uranu a dalších inkompatibilních prvků ze zemského pláště do kontinentální kůry, a v rámci samotné kůry dochází k nejvýraznějšímu obohacení v jejích svrchních částech (obrázek 1). Z toho vyplývá, že nejvíce **frakcionovaná felzická (kyselá) magmata** mají tendenci dosahovat nejvyšších koncentrací uranu a mohou tak po následné solidifikaci a krystalizaci granitové a/nebo ryolitové taveniny představovat potenciální zdroj uranu. Avšak uranová ložiska spjatá pouze s primárními magmatickými procesy jsou spíše ojedinělá, jelikož průměrné koncentrace uranu v granitických horninách dominantně budujících kontinentální kůru se obvykle pohybují mezi **2 až 4 ppm uranu**. Navíc uran je převážně vázán v krystalové struktuře hlavních akcesorických minerálů v granitických horninách, což neumožňuje jeho efektivní vyvázání v důsledku interakce s hydrotermálními fluidy (kapitola 2.2).



**Obrázek 1.** Pozice rozdílných typů uranových ložisek ve vztahu k hlavním frakcionačním procesům v rámci geologického cyklu uranu. Obrázek převzat z práce Cuney (2012)

Vůbec prvním mechanismem zvyšujícím koncentrace uranu v přírodním prostředí bylo parciální tavení primitivního pláště (21 ppb U; obrázek 1) následované frakční krystalizací parciálních tavenin v průběhu jejich výstupu na povrch. Významnou etapou v průběhu geologického vývoje spojeného s postupným navyšováním zastoupení uranu v horninovém prostředí však byl vznik kontinentální kůry a s tím spojený vývoj deskové tektoniky, která umožňovala generaci vysoce frakcionovaných magmatických členů vyznačujících se výrazným obohacením uranu (kapitola 2.1). Rovněž následkem deskové tektoniky docházelo k rozsáhlé krustální recyklaci v důsledku subdukce korového materiálu, jež vedla k obohacení (refertilizaci) zemského pláště o některé inkompatibilní prvky včetně uranu. Nízkým stupněm parciálního tavení obohaceného plášťového zdroje bývají zároveň produkovány peralkalické magmatické taveniny charakteristické vysokým stupněm depolymerizace, jejichž následná frakcionace může vést ke vzniku vysoce alkalických frakcionovaných členů s anomálními koncentracemi uranu a dalších inkompatibilních prvků (kapitola 3.1.1).

## 2. Mechanismus vzniku uranových ložisek

Extrémní diverzita uranových ložisek (kapitola 3) jednoznačně dokládá, že jejich geneze zpravidla zahrnuje polyfázové geologické procesy, které mají za následek mobilizaci uranu v horninovém prostředí a jeho následnou akumulaci doprovázenou vznikem uranové mineralizace. Pro pochopení zjednodušeného mechanismu vzniku většiny uranových ložisek je nezbytné znát hlavní geologické, chemické a fyzikální faktory kontrolující genezi uranové mineralizace. V rámci této kapitoly jsou popsány základní faktory řídící vznik uranových ložisek, mezi které patří: 1. **charakter a složení zdroje uranu**, 2. **způsob vyvázání (mobilizace) uranu z potenciálního zdroje**, 3. **složení a schopnost hydrotermálních fluid mobilizovat uran v horninovém prostředí** a 4. **akumulace (trapping) uranu spojená se vznikem uranové mineralizace**.

### 2.1 Charakter a složení zdroje uranu

Jak bylo popsáno v předcházející kapitole 1, ke zvyšování koncentrací uranu v přírodním geologickém prostředí zpravidla dochází v důsledku různých frakcionačních procesů, kdy například vlivem rozsáhlé magmatické diferenciacce vznikají více frakcionované horniny typicky se vyznačující zvýšeným obsahem uranu a dalších inkompatibilních prvků. Z tohoto důvodu jsou nejčastějšími potenciálními zdroji kyselá felzické plutonické nebo vulkanické horniny, které vzhledem k jejich vyšším stupňům frakcionace a zvýšeným koncentracím uranu mohou za určitých předpokladů představovat vhodný zdroj uranu.

Avšak vysoké koncentrace uranu v potenciální zdrojové hornině nejsou jediným důležitým faktorem, který určuje, zda plutonická nebo vulkanická hornina představuje vhodný zdroj uranu pro jeho následné vyvázání a mobilizaci v rámci horninového prostředí. Obecně platí, že magmatické horniny musí obsahovat relativně **vysoké koncentrace uranu** (až několik desítek ppm), které jsou dominantně obsaženy **v akcesorických minerálech umožňujících vyvázání uranu** z jejich krystalové mřížky, nejčastěji v důsledku post-magmatické hydrotermální alterace. Zcela zásadní roli tak hraje **geochemické složení magmatických hornin** určující charakter a složení hlavních akcesorických minerálů nesoucích uran a další inkompatibilní prvky. Celkem 3 základní typy plutonických hornin (obvykle felzické granity) nebo vulkanických hornin (zejména ryolity a kyselá vulkanoklastika) mohou obsahovat dostatečné koncentrace uranu, které lze loužit za určitých podmínek. Jde o typy 1. **peralkalické**, 2. **peraluminické** a 3. **metaluminické**.

V případě **peralkalických tavenin** hraje zcela zásadní roli, o jaký typ magmatické horniny se jedná, zda o plutonické intruze, anebo jejich vulkanické ekvivalenty. Peralkalické plutonické komplexy bývají obvykle obohaceny uranem a dalšími inkompatibilními prvky, kdy v důsledku narůstající intenzity frakcionace dochází k současnému nárůstu koncentrací těchto prvků v tavenině, tudíž zpravidla vznikají komplexní silikáty a siliko-fosfáty (kapitola 3.1.1) představující hlavní nositele uranu v peralkalických intruzích. Navzdory signifikantním zásobám a koncentracím uranu v těchto plutonických horninách se jejich těžba z ekonomického hlediska nevyplatí, a to kvůli **technologicky a finančně náročné extrakci uranu** z komplexních minerálních fází nesoucích uran.

Pouze v případě radiačního poškození (metamiktizace) na uran bohatých komplexních silikátových fází může případně dojít k hydrotermální mobilizaci uranu z jejich krystalové mřížky a následnému transportu uranu řízenému fluidy, což vede ke vzniku hydrotermálních ložisek. Typickým příkladem je ložisko **Bokan Mountain** (Aljaška), kde byl uran remobilizován z peralkalických plutonů v důsledku radiačního poškození akcesorických minerálů a jejich následné hydrotermální alterace, která vedla ke vzniku hydrotermální žilné mineralizace v blízkosti původních matečních hornin.

Na rozdíl od peralkalických plutonických hornin představují jejich vulkanické ekvivalenty naprosto ideální zdroj uranu, zejména s ohledem na velmi vysoké koncentrace uranu, který je primárně koncentrován ve vulkanickém skle (vulkanické sklo je snadno rozpustné v důsledku interakce s oxidačními hydrotermálními roztoky). Při hydrotermální destabilizaci na uran bohatého vulkanického skla (**devitrifikaci**) zpravidla dochází k rozsáhlé remobilizaci značných obsahů uranu, což za určitých podmínek může vést ke vzniku významných hydrotermálních vulkanických ložisek (kapitola 3.2.3). Charakteristickým příkladem je **Streltsovka kaldera** (Rusko), která vyprodukovala enormní množství frakcionované peralkalické ryolitové taveniny bohaté na uran. Následně vlivem interakce s oxidačními hydrotermálními fluidy došlo k devitrifikaci vulkanického skla doprovázené remobilizací uranu a dalších inkompatibilních prvků obsažených ve skle. Právě kvůli vysokým koncentracím uranu a relativně snadné loužitelnosti a mobilizaci uranu z peralkalických ryolitových materiálů představují peralkalické vulkanity ideální zdroj uranu pro vznik ložisek.

Klasické **peraluminické plutonické a vulkanické** horniny, obecně označované jako S-typové horniny (Chappel a White, 1974), zpravidla nepředstavují vhodný zdroj uranu pro vznik ložisek, a to kvůli jejich spíše nízkým celohorninovým koncentracím uranu odpovídajícím průměrným obsahům uranu v zemské kůře (obrázek 1). Navíc charakter a povaha hlavních

akcesorických fází v peraluminických horninách (obvykle monazit) neumožňují snadné vyvázání a mobilizaci uranu z jejich krystalové struktury v důsledku radiačního poškození a následné hydrotermální alterace.

Kromě klasických S-typových granitů rozlišují geologové také **L-typ granitů** (Cuney, 2014), které jsou naopak považovány za fertilní zdroj uranu, ideální pro vznik uranových ložisek. Právě L-typové granity (*pozn. označení podle peraluminických leukokrátních granitů z oblasti Limousin ve Francii*) představují hlavní zdroj uranu pro nejvýznamnější hydrotermální granitická ložiska spojená s **variským orogenním pásmem v Evropě** (kapitola 3.2.2). Odlišnost v geochemickém složení klasického S-typu a na uran fertilního L-typu spočívá v rozdílných stupních parciálního tavení různých protolitů. S-typové granity zpravidla vznikají relativně vysokým stupněm parciálního tavení (> 50 %) protolitu s relativně nízkým obsahem uranu (zejména metadroby), což generuje výsledné granitoidní taveniny s průměrnými koncentracemi uranu. Naopak L-typ granitu vzniká nižším stupněm parciálního tavení (< 30 %) protolitu bohatého na uran (např. metarkózy, kyselé metavulkanity nebo metagranity), což produkuje dvojslídne felzické granity s koncentracemi uranu dosahujícími až několik desítek ppm.

Navzdory vysokým celkovým obsahům uranu v těchto horninách určuje fertilitu (schopnost vyvázání uranu ze zdrojové horniny) L-typových peraluminických granitů zejména **přítomnost primárního magmatického uraninitu, který je hlavním nositelem uranu v těchto horninách**. Uraninit je totiž velmi snadno rozpustný při interakci s oxidačními hydrotermálními roztoky, a tudíž může být relativně velké množství uranu efektivně mobilizováno a následně transportováno z granitických plutonů v důsledku rozsáhlé hydrotermální alterace. Pro krystalizaci primárního magmatického uraninitu v granitoidních horninách jsou nezbytné celkové obsahy uranu dosahující přibližně několika desítek ppm.

Posledním typem jsou **metaluminické magmatity**, zpravidla odpovídající I-typovým granitům nebo jejich případným vulkanickým ekvivalentům, které mohou představovat potenciální zdroj uranu jen za určitých podmínek. Charakteristickým rysem těchto hornin jsou relativně vysoké koncentrace draslíku, thoria, uranu a dalších inkompatibilních prvků. Obvykle se jedná o vysoce draselné vápenato-alkalické, šošonické až ultradraselné magmatické série.

Metaluminické horniny se typicky vyznačují vysokým obsahem vápníku v porovnání s peraluminickými a peralkalickými magmaty, což zásadně ovlivňuje charakter hlavních asociací akcesorických minerálů. Při vysokém obsahu CaO v silikátové tavenině obvykle

dochází ke krystalizaci na vápník bohatých akcesorií, jako je například **titanit** [CaTiSiO<sub>5</sub>] nebo **allanit** [(Ce, Ca, Y, La)<sub>2</sub>(Al, Fe<sup>+3</sup>)<sub>3</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)]. Pokud dostatečně naroste celkový poměr Th/REE v metaluminické tavenině, dochází ke společné krystalizaci uranu a thoria ve formě **thoritu** [(Th, U)SiO<sub>4</sub>], který v krystalové struktuře může koncentrovat až 30 hm. % UO<sub>2</sub>. V důsledku zvýšených koncentrací uranu v magmatu může současně s thoritem krystalizovat i magmatický **uraninit**, jehož charakteristickým rysem jsou vysoké obsahy ThO<sub>2</sub>, pohybující se běžně v rozmezí od 8 do 15 hm. %. Z výše uvedeného vyplývá, že charakter akcesorických fází v metaluminických magmatických horninách může být značně variabilní s ohledem na chemismus a celkový vývoj (např. frakcionaci) silikátové taveniny.

Minerály, jako jsou například thorit, titanit a allanit, obvykle bývají rezistentní vůči pozdní hydrotermální alteraci, která následuje krátce po solidifikaci granitoidní intruze, a tudíž nemohou uvolňovat uran při interakci s cirkulujícími roztoky. Avšak v důsledku jejich zvýšených koncentrací uranu a dalších aktinidů často dochází k **radiačnímu poškození jejich krystalové struktury**, obecně označovanému jako metamiktizace, jež má za následek snížení jejich chemické odolnosti vůči interagujícím hydrotermálním fluidům, což vyvolává rozsáhlou alteraci a případné vyvázání uranu a dalších inkompatibilních prvků z jejich struktury do vodných roztoků. Z tohoto důvodu je zcela zásadní **dostatečný časový interval** mezi vmístěním, potažmo krystalizací granitoidní taveniny, a následnou hydrotermální alterací, aby došlo k akumulaci radiačního poškození v hlavních akcesorických minerálech, které se následně stávají náchylnými k remobilizaci jejich hlavních komponent z metamiktické krystalové struktury při interakci s hydrotermálními fluidy. Pro zajímavost uvedme, že takový časový interval odpovídá zhruba **30 až 50 milionům let**, jak dokládá časová asociace mezi vmístěním na uran fertálních karbonských leukogranitů v rámci evropských Variscid a vznikem permské uranové mineralizace (např. Ballouard et al., 2017; Cathelineau et al., 1990; Velichkin a Vlasov, 2011).

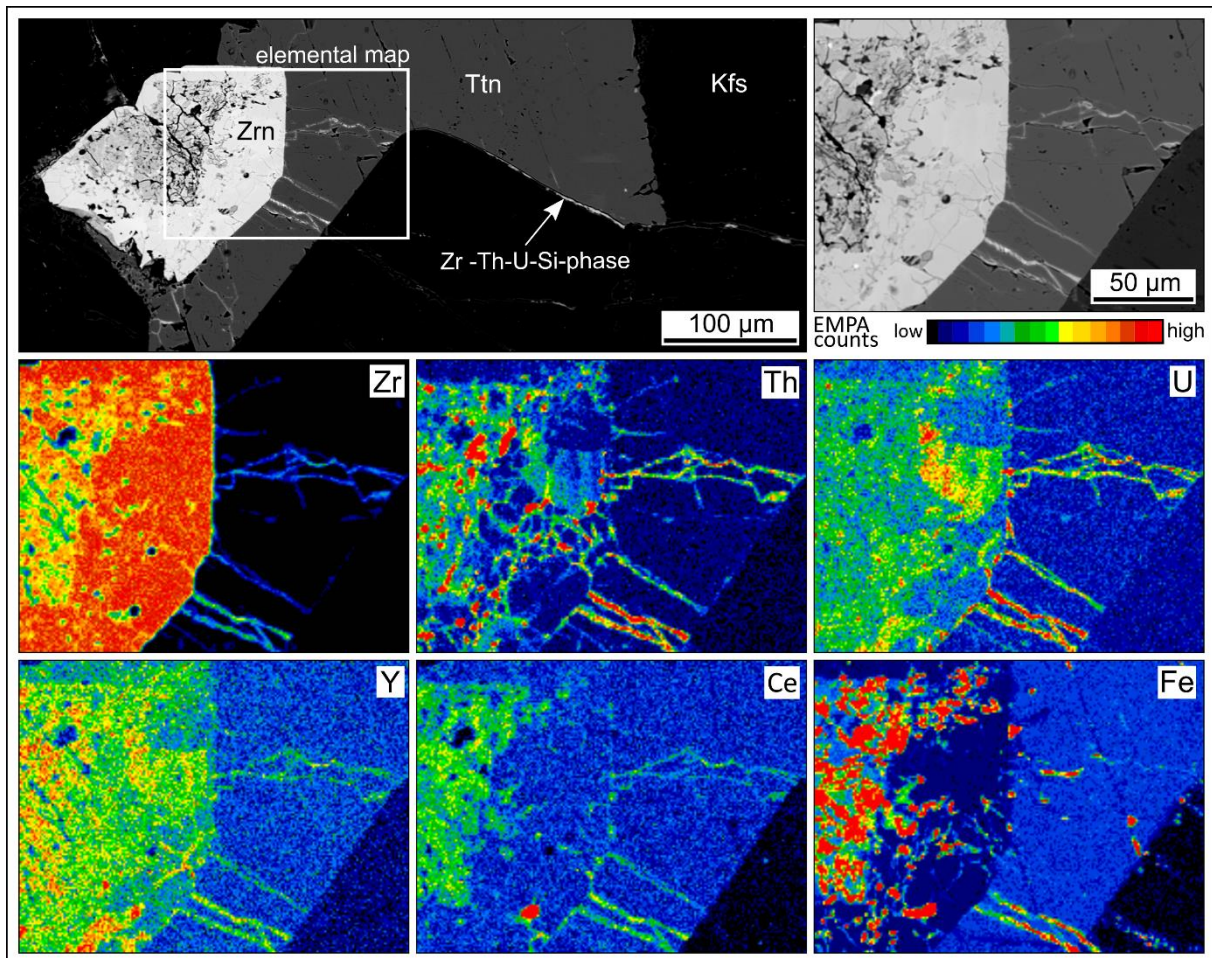
## 2.2 Vyvázání a mobilizace uranu ze zdroje

Dalšími klíčovými faktory řídícími vznik uranových ložisek jsou vyvázání a následná remobilizace uranu z jeho primárního zdroje. Jak bylo vysvětleno v předcházející kapitole 2.1, hlavním nositelem uranu v horninovém prostředí bývají převážně **akcesorické minerály**, přičemž některé z nich mají schopnost koncentrovat velké množství uranu zabudovaného přímo v krystalové struktuře daného minerálu. Uran je obvykle pevně vázán v rámci krystalové mřížky a představuje tak jednu ze stavebních součástí (primárních komponent) určitého

minerálu. Z toho vyplývá, že zcela zásadní roli hraje **charakter dané krystalové struktury** minerálu, stejně jako **typ vazebních sil** (např. iontové, kovalentní, kovové) udržujících celou krystalovou mřížku pohromadě. Právě tyto výše uvedené faktory kontrolují, jakým způsobem a jak snadno bude uran vyvázan z krystalové struktury minerálu a zda charakter struktury a typ vazebních sil umožní případnou remobilizaci uranu z jeho původního zdroje.

Charakter a složení hlavních nositelů uranu a dalších nekompatibilních prvků zásadně ovlivňuje geochemické složení magmatické taveniny, jak bylo podrobněji uvedeno v kapitole 2.1. S ohledem na chemické složení taveniny, tedy obsah hlavních a stopových prvků, krystalizují rozdílné minerální asociace. Jedním z nejvýznamnějších primárních zdrojů uranu v granitických horninách je **magmatický uraninit**, který se vyznačuje relativně vysokými koncentracemi  $\text{ThO}_2$  v metaluminických taveninách, na rozdíl od peraluminických L-typových granitů běžně obsahujících uraninit s nízkým obsahem  $\text{ThO}_2$  v důsledku nízkých celohorninových Th/U poměrů. Magmatický uraninit s nízkým obsahem thoriumu bývá zpravidla **dobře rozpustný v oxidačních roztocích** a umožňuje tak uvolnění velkého množství uranu z horniny vlivem post-magmatické hydrotermální alterace.

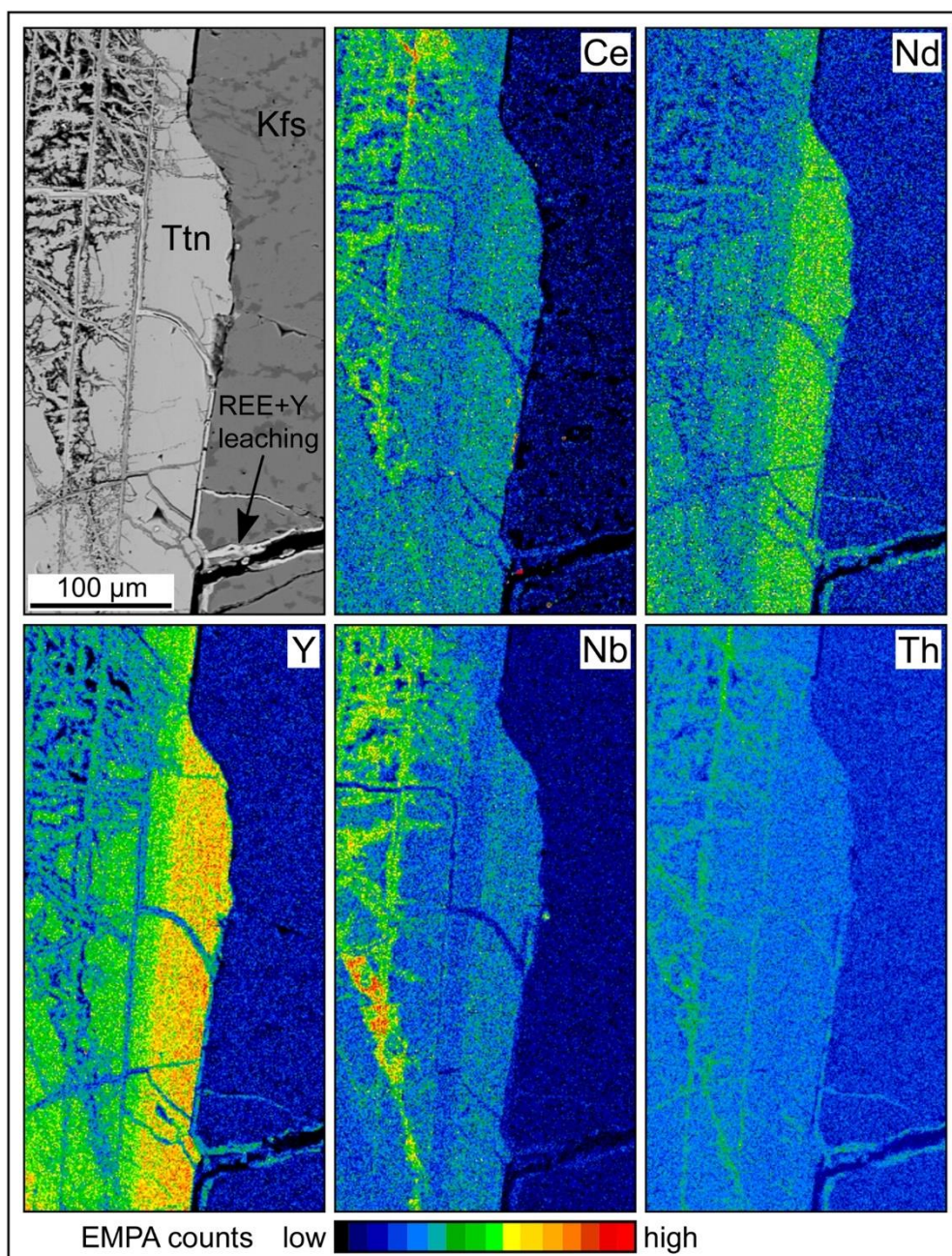
Naopak běžné akcesorické minerály vyskytující se v granitických horninách (např. zirkon, titanit, thorit, allanit, monazit, apatit) jsou za určitých podmínek **odolné vůči post-magmatické hydrotermální alteraci** a neumožňují vyvázení a mobilizaci uranu ze zdroje, zejména krátce po vmístění a krystalizaci magmatické taveniny. Nicméně u některých z těchto na uran bohatých minerálů dochází v průběhu geologického času k **akumulaci radiačního poškození** v rámci jejich krystalové struktury, v důsledku čehož se poté stávají více náchylnými k různým alteračním procesům zodpovědným za vyvázení uranu z jejich radiačně poškozené krystalové struktury. Vlivem vysoké intenzity radiačního poškození mohou i chemicky stabilní a odolné minerály, jako jsou například zirkon a titanit, uvolnit velké množství nekompatibilních prvků při interakci s hydrotermálními fluidy (obrázek 2 a 3).



**Obrázek 2.** BSE snímky a prvkové distribuční mapy znázorňující masivní mobilizaci uranu a dalších inkompatibilních prvků z radiačně poškozeného zirkonu, následně postiženého intenzivní hydrotermální alterací. Migrace prvků probíhala zejména podél puklin a mikrotrhlin, typicky obklopujících metamiktní zirkon, a následně podél hranic okolních minerálů a hojných puklin vznikajících v důsledku objemové expanze způsobené radiačním poškozením krystalové struktury zirkonu. Obrázek převzat z práce Kubeš et al. (2021)

V důsledku radiačního poškození krystalové struktury dochází rovněž k **objemové expanzi** metamiktního minerálu, což zákonitě vede ke **vzniku systému hojných puklin a mikrotrhlin** obklopujících metamiktní fázi, které umožňují následnou infiltraci a cirkulaci hydrotermálních roztoků způsobujících případnou alteraci. Nově vytvořené pukliny a mikrotrhliny tak představují vhodné **migrační dráhy** (obrázek 2) pro vyvázané primární komponenty ze silně alterovaných a radiačně poškozených akcesorických minerálů koncentrujících vysoké obsahy uranu a dalších inkompatibilních prvků. Hornina s velkým zastoupením radiačně poškozených akcesorických minerálů tak může obsahovat rozsáhlý systém mikrotrhlin, a tudíž se stává náchylnější k různým alteračním procesům zodpovědným za mobilizaci prvků z jejich zdroje.





**Obrázek 3.** BSE snímek a prvkové distribuční mapy zachycující rozsáhlou alteraci titanitu vedoucí k vyvázání a migraci vybraných nekompatibilních prvků z intenzivně alterovaného zrna titanitu. V důsledku hydrotermální alterace došlo k mobilizaci prvků podél štěpných ploch krystalu titanitu, podél kontaktů s okolními horninovými minerály, hojných puklin a mikrotrhlin obklopujících alterované zrna. Obrázek převzat z práce Kubeš et al. (2021)

### 2.3 Schopnost hydrotermálních fluid mobilizovat uran

Schopnost hydrotermálních roztoků mobilizovat uran společně s dalšími inkompatibilními prvky je dána především jejich **chemickým složením, oxidačně-redukčními podmínkami a teplotou**. Zcela zásadní roli při mobilizaci uranu spojené se vznikem významných uranových ložisek hrají zejména chemismus (zastoupení hlavních iontových komplexů) a oxidační stav hydrotermálních fluid. Teplotní podmínky vzniku ložisek mohou být značně variabilní, což dokládá extrémní diverzita uranových ložisek (kapitola 3) vázaných jak na vysokoteplotní geologické procesy (např. hydrotermální metasomatity), tak na nízkoteplotní prostředí (např. infiltrační ložiska).

Mobilizace nebo naopak zadržetí uranu v přirozeném horninovém prostředí jsou závislé zejména na **oxidačně-redukčních podmínkách**. V tomto kontextu se uran chová relativně předvídatelně, jelikož jeho oxidační stav určuje, zda je v geologickém prostředí mobilní, anebo naopak. Oxidovaná forma uranu  $U^{6+}$  se vyznačuje značnou mobilitou v hydrotermálních systémech a umožňuje tak migraci uranu na velmi dlouhé vzdálenosti. Z tohoto důvodu jsou vhodným transportním činitelem například **oxidační meteoritické vody**, které mohou vyvázat uran z primárního zdroje (viz kapitola 3.3), následně jej mobilizovat a přispět tak ke vzniku uranové mineralizace za určitých podmínek. Na druhé straně redukovaná forma uranu  $U^{4+}$  je ve vodných roztocích zcela nemobilní, z čehož vyplývá velmi zjednodušený, ale zcela zásadní mechanismus vzniku uranových ložisek. Tento zjednodušený mechanismus geneze uranových ložisek zahrnuje změnu oxidačně-redukčních podmínek, v důsledku níž dochází k **redukci mobilního  $U^{6+}$  na nemobilní  $U^{4+}$** , což zákonitě vede k akumulaci uranu (kapitola 2.4) v horninovém prostředí, spojené se samotným vznikem ložiska.

Dalším klíčovým faktorem kontrolujícím mobilitu uranu a dalších inkompatibilních prvků v hydrotermálních systémech je chemické složení vodných roztoků a podzemních vod cirkulujících v rámci horninového prostředí. Pro zajímavost uveďme, že kromě uranu byly některé inkompatibilní prvky (např. HFSE a REE) dlouhou dobu považovány za zcela nemobilní v hydrotermálních roztocích. Nicméně v současnosti neustále narůstá množství přímých důkazů publikovaných ve významných vědeckých časopisech (např. Anenburg et al., 2020; Honour et al., 2018; Kubeš et al., 2021; McGloin et al., 2016), jež dokládají významnou mobilitu těchto inkompatibilních prvků v závislosti na **zastoupení a charakteru hlavních iontových komplexů** v hydrotermálních systémech.

Ve srovnání s různými geologickými prostředími bývají vysoce alkalické magmatické a hydrotermální systémy typicky nejvíce obohaceny o inkompatibilní prvky a mohou tak představovat potenciální ekonomicky významná ložiska HFSE a REE. V souladu s pozorováním přírodních systémů ukazují některé experimentální studie, že inkompatibilní prvky mají tendenci být značně mobilní v **hydrotermálních roztocích bohatých na alkálie a/nebo fluor**. Zejména **fluoridové ionty** bývají obecně považovány za hlavní komplexní ligandy schopné transportovat HFSE a REE na relativně dlouhé vzdálenosti v rámci hydrotermálních fluid. Jak dokládají mnohá pozorování z přírodních a laboratorních podmínek, vodné roztoky obsahující zvýšené koncentrace Cl, CO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> a jejich možných vzájemných kombinací mají schopnost transportu inkompatibilních prvků. Jejich zastoupení v hydrotermálních roztocích tak může být využito k vysvětlení vzniku hydrotermální HFSE a REE mineralizace.

Význam fluoridových komplexů pro rozsáhlou fluidy řízenou remobilizaci HFSE a REE rovněž dokládají výsledky získané v rámci **projektu GeoBarr**, které zaznamenávají masivní mobilizaci těchto inkompatibilních prvků ve vysoce alkalických magmatických horninách, jež se obecně vyznačují vysokým obsahem stopových prvků. V tomto případě došlo k intenzivní alteraci primárního magmatického zirkonu a titanitu a následné remobilizaci HFSE a REE, jež byla zaznamenána pomocí BSE snímkování a prvkových distribučních map (obrázky 2 a 3). Vysoká **aktivita fluoridových ligand** společně s vysokou **alkalitou hydrotermálních roztoků** (pH 8–12) vedla k mobilizaci a transportu uranu a dalších HFSE na velmi dlouhé vzdálenosti, což dokládá blízká prostorová asociace mezi některými hydrotermálními nízkoteplotními uranovými ložisky ze západomoravské uranové provincie a vysoce alkalickými syenity představujícími geochemicky vyvinuté členy tzv. durbachitové série (Kubeš et al., 2021).

Tato pozorování dále potvrzují novější poznatky získané rovněž v průběhu řešení projektu GeoBarr, které se převážně týkají chemického složení uranové mineralizace z významných ložisek západomoravské uranové provincie. **Extrémní mobilitu HFSE a REE** na velmi dlouhé vzdálenosti, patrně podmíněnou výrazným zastoupením fluoridových komplexů a vysokou alkalitou fluid, rovněž reflektují chemické signatury nízkoteplotní hydrotermální uranové mineralizace v některých ložiscích vyznačujících se neobvyklým obohacením o některé inkompatibilní prvky, jako jsou např. Zr, Nb, Ti, Y, a REE (Wertich et al., 2022), jež zpravidla dosahují vysokých koncentrací zejména ve vysokoteplotních magmatických typech ložisek (kapitola 3.1.2).

## 2.4 Akumulace uranu v horninovém prostředí

Hlavním mechanismem kontrolujícím akumulaci a následné vysrážení uranu v přírodním horninovém prostředí je změna oxidačně-redukčních podmínek, jak bylo zmíněno v předcházející kapitole 2.3. Obvykle dochází k **redukci oxidované formy  $U^{6+}$** , která je typicky vysoce mobilní v hydrotermálních roztocích, na redukovanou formu  $U^{4+}$  vyznačující se naopak imobilní povahou v rámci vodných roztoků. Redukovaná forma uranu tak zůstává zadržena v geologickém prostředí a její výrazná akumulace tedy může zákonitě vést ke vzniku významných uranových ložisek.

Pro klíčovou změnu oxidačně-redukčních podmínek hydrotermálního systému je zásadní přítomnost tzv. **redukčního činidla**, při jehož interakci s vodnými roztoky nesoucími uran zpravidla dochází k redukci mobilního  $U^{6+}$  na nemobilní  $U^{4+}$ , doprovázené zachycením a akumulací uranu v horninovém prostředí. S ohledem na mineralogické a geochemické složení horninového podloží umožňujícího cirkulaci mineralizovaných roztoků bývají charakter a povaha redukčního činidla často značně variabilní. V případě krystalinického basementu, ať už v podobě granitických plutonů, nebo metamorfovaných komplexů, může být potenciální redukční činidlo zastoupeno ve formě hornin obsahujících hojně **sulfidické fáze** a/nebo starší **sulfidickou mineralizaci**. Případná tektonická postižení krystalinického podloží umožňující vznik zlomového a puklinového systému, na který jsou vázány polohy kataklazitů s výrazným zastoupením **grafitizovaných zón** a **poloh bohatých na bitumen**, rovněž představují ideální redukční činidlo pro zadržení uranu v horninovém prostředí. Mimo jiné mohou také magmatické a metamorfované horniny bohaté na **silikáty s vysokým obsahem  $Fe^{2+}$**  (např. biotit, chlorit) zadržovat a akumulovat uran v basementu, kde obvykle vznikají intenzivně alterované horniny označované jako metasomatity, které za určitých podmínek mohou být mineralizované uranem (kapitola 3.2.1).

Naopak v rámci sedimentárních formací bývají redukční činidla přítomna nejčastěji v podobě organického materiálu, který zahrnuje např. detritické rostlinné zbytky, jílový materiál, mořské řasy atd. V těchto případech bývá obvykle uran adsorbován na povrchu **organického materiálu**, při jeho výraznějším zastoupení může docházet k navázání velkého množství uranu a vzniku samotného ložiska. Dalšími možnými redukčními činidly v sedimentárních sekvencích jsou také **akumulace uhlovodíků** (např. ropa, uhlí, bitumen), **sulfidických fází** a **vulkanického materiálu**, který obsahuje na  $Fe^{2+}$  bohaté silikáty umožňující redukci oxidované formy uranu v hydrotermálních roztocích.

**Ložisko Rožná** ze západomoravské uranové provincie představuje unikátní typ uranového zrudnění vázaného na rozdílné typy redukčních činidel (Kříbek et al., 2009), která hrála klíčovou roli při genezi 3 základních typů uranové mineralizace, jimiž jsou: 1. rudné zóny s výraznými projevy chloritizace, pyritizace a grafitizace, 2. rudné žíly s masivním uraninitem a karbonátovou žilovinou a 3. metasomatity. Nejvýznamnějším typem zrudnění v ložisku Rožná byly **grafitizované směrné zóny kataklazitů** a k nim zpeřené struktury nižších řádů vyskytující se v rámci metamorfovaného basementu. Na tyto struktury se v ložisku Rožná pojí více než 90 známých ložiskových těles (Kříbek a Hájek, 2005). Rozmístění rudných těles je dáno zejména geochemií okolních hornin, strukturními poměry, porozitou, deformací a rozpukáním hornin. Uranové zrudnění je tvořeno převážně coffinitem o několika generacích, uraninitem s proměnlivou intenzitou coffinitizace a méně zastoupeným branneritem. Efektivním redukčním činidlem v zónách kataklazitů je zejména hojně zastoupený grafit a doprovodné rudné minerály ve formě sulfidů (např. pyrit, markazit, galenit, chalkopyrit).

Vznik **rudných žil s masivním uraninitem a karbonátovou žilovinou** je spojen s pohyby podél hlavních tektonických zón. Zpeřené struktury jsou vyplněny rudnými žilami s karbonátem. Kromě dominantně zastoupené karbonátové žiloviny s masivním uraninitem a proměnlivě se vyskytujícím coffinitem bývají rovněž hojně přítomny sulfidické fáze (např. pyrit, galenit), které v tomto typu zrudnění představovaly hlavní redukční činidlo zodpovědné za vznik uraninit-karbonátové mineralizace. V asociaci s uraninitem se v ložisku u žilného typu uranové mineralizace objevují i selenidy, které místy částečně zatlačují původní uraninit.

Poslední typ uranové mineralizace představují **metasomatity** vyskytující se v podobě intenzivně alterovaných a porézniých hornin přiléhajících ke směrným strukturám ložiska, případně se nacházející v blízkém okolí i v rámci samotných rudných zón. Metasomatity se vyznačují výraznou hematitizací, albitizací a karbonitizací původních hornin. Hlavním rudným minerálem je coffinit a uraninit-coffinitové agregáty, jež typicky vytvářejí vtroušeninovou mineralizaci vázanou na intenzivně alterované horniny. Vznik uranového zrudnění byl řízen interakcí hydrotermálních roztoků s horninami obsahujícími na  $Fe^{2+}$  bohaté silikáty (chlorit, biotit), které společně se sulfidickými minerály (pyrit, chalkopyrit, sfalerit, galenit) představovaly vhodné redukční činidlo pro akumulaci uranu a vznik mineralizovaných metasomatitů v ložisku Rožná.

### 3. Klasifikace a diverzita uranových ložisek

Charakteristickým rysem uranových ložisek je jejich extrémní diverzita, jelikož obvykle vznikají v naprosto kontrastním geologickém prostředí a za zcela rozdílných tlakově-teplotních (PT) podmínek, když je srovnáme s jinými rudnými/nerudnými ložisky asociovanými s určitým litologickým typem a PT vývojem (např. likvační Ni-Cu-PGE ložiska v ultrabazických komplexech, porfyrové Cu-Mo rudy v rámci intermediálních až felzických magmat na kontinentálním okraji či ostrovních obloucích, reziduální zvětralinová ložiska kaolinu spjatá s matečnou horninou bohatou na živce atd.). Tuto rozsáhlou genetickou diverzitu reflektují dřívější klasifikace uranových ložisek publikované Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency = IAEA), zahrnující přibližně 15 hlavních typů a dalších 50 subtypů, které byly vyčleněny převážně s ohledem na charakter a složení hlavních horninových systémů asociovaných s uranovou mineralizací (např. ložiska intruzivní, vulkanická, metasomatická, metamorfni atd.).

Nicméně geneze uranových ložisek je většinou spojena s polyfázovými a komplexními geologickými procesy (viz kapitola 2), které obvykle zahrnují vznik a vývoj potenciálního zdroje uranu (intruze/frakcionace felzického magmatu), následné vyvázání/mobilizaci uranu ze zdroje (post-magmatická hydrotermální alterace) a samotnou akumulaci uranu a vznik ložisek v horninovém prostředí (interakce mineralizujících fluid s redukčním činidlem). S ohledem na výše uvedené aspekty byla vytvořena novější a přehlednější klasifikace uranových ložisek (Cuney a Kyser, 2015), která bere v potaz geologické, fyzikální a chemické procesy kontrolující jejich vznik. Tato genetická klasifikace uranových ložisek vyčleňuje celkem 5 základních typů a zhruba dalších 20 subtypů, které jsou seřazeny podle teplotních podmínek jejich vzniku (tabulka 1) – od ložisek vznikajících za nejvyšších teplot (magmatická) po nízkoteplotní ložiska (syn-sedimentární).

Avšak některá uranová ložiska představují komplexní hybridní systémy, jako třeba ložiska Fe-oxidických rud mědi a zlata (iron oxide copper-gold = IOCG), jejichž polyfázový vývoj zpravidla zahrnuje input více typů mineralizačních fluid s rozdílnými zdroji, např. 1. meteoritickou a mořskou vodu společně se solankami generovanými v rámci pánevních a jiných povrchových systémů, 2. metamorfogenní fluida a 3. magmatogenní fluida. Z tohoto důvodu je IOCG mineralizace obvykle řazena do speciální kategorie „ostatní“ (viz tabulka 1). Hlavním zástupcem tohoto genetického typu je ložisko Olympic Dam v Austrálii, které zároveň představuje jedno z nejvýznamnějších světových ložisek uranu kvůli jeho extrémním zásobám uranu dosahujícím až 1 907 000 tun při kovatosti 0,025 % U.

**Tabulka 1.** Genetická klasifikace uranových ložisek (upraveno podle Cuney a Kyser, 2015)

Typy ložisek	Velikost	% U	Stáří	Příklady
<b>magmatická</b> – diferenciacie magmatu				
<i>frakční krystalizace</i>	malá/střední	0,1	≤ 2,7 Ga	Ilímaussaq
<i>parciální tavení</i>	velká	0,01	≤ 1,8 Ga	Rössing
<b>hydrotermální</b> – fluidy řízená alterace a mobilizace uranu				
<i>hydrotermální vulkanická</i>	malá/velká	0,05–0,2	jura–křída	Streltsovka
<i>hydrotermální granitická</i>	malá/velká	0,1–0,6	perm, křída	Variscan EU
<i>hydrotermální diagenetická</i>	malá/velká	0,1–20		
❖ <i>tabulární</i>	malá/velká	0,1–0,2	post-silurská	Grants
❖ <i>kolapsové brekcie</i>	malá	0,1–0,9	jura	Colorado
❖ <i>typ unconformity</i>	rozsáhlá	0,2–20	1,7–1,3 Ga	Athabasca
<i>hydrotermální metamorfovaná</i>	malá/velká	≤ 0,4		Shinkolobwe
<i>hydrotermální metasomatická</i>	malá/velká	0,1–0,2		
❖ <i>Na-metasomatity</i>	malá/velká	0,1–0,2	1,8–0,5 Ga	Michurinka
❖ <i>K-metasomatity</i>	velká	0,1		Elkon
❖ <i>skarny</i>	malá	0,1	1,8–0,5 Ga	Tranomaro
<b>infiltrační</b> – infiltrace meteorické vody				
❖ <i>tabulární typ</i>	malá/velká	0,01–0,1	terciér	Blizzard
❖ <i>roll-front typ</i>	rozsáhlá	0,01–0,2	jura–křída	Wyoming
<b>syn-sedimentární</b> – akumulace uranu v sedimentárních formacích				
<i>mechanické třídění</i>	velká	0,02–0,15	2,9–2,4 Ga	Witwatersrand
<i>redoxní zachycení (uhlí, lignit)</i>	malá/velká	0,001–0,5	paleozoikum	Kazachstán
<i>redox-chemogenní (fosfáty)</i>	rozsáhlá	0,005–0,03	křída	Maroko
<b>ostatní</b>	rozsáhlá	0,01–0,04	1,6–1,0 Ga	Olympic Dam

### 3.1 Magmatická ložiska

Magmatická ložiska uranu obvykle vznikají v důsledku procesů spojených s diferenciací magmatu, avšak na jejich genezi se mohou rovněž podílet následné post-magmatické procesy zahrnující uvolnění hydrotermálních fluid v pozdních fázích magmatické diferenciaci, jež mohou podmínit významnou remobilizaci a akumulaci uranu v podobě ložisek. Ke hlavním dvěma subtypům spadajícím do této genetické kategorie patří magmatická ložiska spojená s **frakční krystalizací** a **parciálním tavením**.

#### 3.1.1 Frakční krystalizace

Tento genetický typ ložisek zpravidla vzniká extrémní frakční krystalizací granitoidní taveniny, jelikož frakční krystalizace představuje jeden z hlavních primárních mechanismů vedoucích k navyšování koncentrací uranu v zemské kůře. Zejména vysoký stupeň frakcionace **peralkalických magmat** může za určitých předpokladů vést k extrémnímu obohacení uranem a dalšími inkompatibilními prvky (REE, HFSE: Th, Zr, Nb, Ta), a to s ohledem na velmi vysoký stupeň depolymerizace peralkalických tavenin vyznačujících se výrazným zastoupením alkálií a velmi vysokou teplotou, jež společně napomáhají zvýšené rozpustnosti těchto inkompatibilních prvků v silikátové tavenině. Z toho vyplývá, že nejvíce frakcionované členy alkalických intruzí bývají obvykle nejvíce obohaceny uranem a mohou tak představovat potenciální ložiska.

Typickým příkladem významných světových ložisek jsou vysoce **alkalické masivy v Grónsku** (Ilímaussaq), na Aljašce (Bokan Mountain), v Rusku (Lovozero) a Brazílii (Poços de Caldas). Rozsáhlá frakcionace plášťových alkalických magmat (např. alkalické bazalty, bazanity, nefelinity) vedla ke vzniku vysoce frakcionovaných členů v podobě foidových syenitů s agpatickou afinitou, v rámci kterých je uran obvykle vázán v podobě komplexních, na HFSE a REE bohatých silikátů a/nebo siliko-fosfátů, nejčastěji zastoupených minerálem stenstrupinem  $[\text{Na}_{14}\text{Mn}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Ce}_6\text{Zr}(\text{Si}_6\text{O}_{18})_2(\text{PO}_4)_6(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ .

S ohledem na komplexní charakter hlavních nositelů uranu v agpatických varietách vysoce alkalických syenitoidů nejsou magmatická ložiska spojená s frakční krystalizací dostatečně ekonomicky rentabilní, jelikož extrakce uranu z těchto nerostů je příliš technologicky a ekonomicky náročná, a tudíž se jejich těžba nevyplatí.



### 3.1.2 Parciální tavení

Magmatická ložiska vznikající parciálním tavením představují anatektické pegmatoidy, obecně označované jako **alaskity** (felzické pegmatitové žíly), vyskytující se v metamorfovaném krystalickém basementu postiženém proměnlivým stupněm migmatitizace. V důsledku rozsáhlé migmatitizace na uran bohatého protolitu dochází k derivaci felzických tavenin (alaskitů), které se vyznačují vysokými koncentracemi uranu. Hlavním nositelem uranu v alaskitech obvykle bývá primární **magmatický uraninit** ( $\text{UO}_2$ ) vytvářející vtroušeninovou mineralizaci. Vedle uraninitu se běžně vyskytují minerály **betafitové skupiny** s obecným chemickým vzorcem  $(\text{Ca}, \text{U})_2(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})$ . Vysokou teplotu tohoto typu mineralizace dokládají zvýšené koncentrace Th, REE a Y v magmatickém uraninitu.

Nejvýznamnějším světovým ložiskem uranu spojeným s parciálním tavením je **Rössing** v Namibii, jehož celkové zásoby odpovídají zhruba 246 000 tunám uranu při velmi nízké kovatosti (300 ppm U). Další významná světová ložiska Charlebois Lake (Kanada), Quebec (Kanada), Husab (Namibie) a Kalinovskoye (Ukrajina) vykazují spíše menší až střední zásoby uranu (tisíce až stovky tisíc tun uranu), typicky s velmi nízkou kovatostí (stovky ppm U), charakteristickou pro tento genetický typ.

### 3.2 Hydrotermální ložiska

Jedná se o největší genetickou skupinu uranových ložisek, která zpravidla vznikají rozsáhlou hydrotermální alterací zdrojových hornin bohatých na uran, následnou remobilizací uranu a jeho finální akumulací v horninovém prostředí. Zdrojové horniny mohou být zastoupeny v podobě **granitických** a/nebo **vulkanických** hornin. Hydrotermální **diagenetická** ložiska bývají typicky asociována se sedimentárními pánevními formacemi vyskytujícími se rovněž v blízkosti zdrojových hornin bohatých na uran. Hydrotermální **metamorfovaná** ložiska běžně vznikají nízkým stupněm metamorfózy sedimentárních hornin, které představují potenciální zdroj hydrotermálních fluid umožňujících vyluhování uranu a jeho následnou mobilizaci v horninovém prostředí. **Metasomatická** ložiska se tvoří za relativně vysokých teplot v důsledku interakce vysoce alkalických hydrotermálních fluid s tektonicky porušeným horninovým basementem, což obvykle vede k rozsáhlé metasomatóze okolních hornin s největší intenzitou alterace zejména podél hojných zlomů a puklin.

### 3.2.1 Hydrotermální metasomatická ložiska

Hydrotermální metasomatická ložiska zahrnují 3 hlavní subtypy: 1. **Na-metasomatity**, 2. **K-metasomatity** a 3. **skarny**. Vznik Na- a K-metasomatitů je obvykle spojen s rozsáhlou infiltrací hydrotermálních fluid do tektonicky porušeného horninového prostředí, nejčastěji tvořeného felzickými granitoidními horninami a metavulkanity, případně metamorfními komplexy až metasedimentárními formacemi. Skarny vznikají zpravidla v důsledku intruze granitoidních magmat do karbonátových litologií v podobě sedimentárních vápenců a mramorů.

Ve světě jsou nejhojněji zastoupeny **Na-metasomatity** s nejrozsáhlejšími výskyty na území Ukrajiny (Krivoy Rog), Brazílie (Lagoa Real), Kanady (Michelin Lake), Indie (Rohill district) a Austrálie (Valhala). Alkalická metasomatóza je obvykle doprovázena **episyenitizací** (rozpuštěním křemene) a **albitizací**, v jejímž důsledku nejčastěji dochází k zatlačování původního plagioklasu a K-živce sekundárním čistým albitem, zároveň vznikají novotvořené fáze s vysokým obsahem sodíku v podobě Na-amfibolu (riebeckitu) a Na-pyroxenu (aegirinu). Hlavními nositeli uranu v Na-metasomatitech obvykle bývají brannerit, uraninit, coffinit a ferropseudobrookit bohatý na uran. Zdrojem uranu zpravidla jsou granitické horniny s vysokým obsahem U, Th a K, jak bylo například prokázáno v případě ložiska Lagoa Real v Brazílii. Naopak fluida zodpovědná za vznik mineralizovaných Na-metasomatitů mohou být kontrastního původu, případně byl popsán mixing různých typů fluid: 1. magmatogenních, 2. diagenních/metamorfogenních, 3. povrchových nebo 4. pánevních solanek (Cuney a Kyser, 2015).

Ložiska **K-metasomatitů** jsou ve světě velmi vzácná, což dokládají ojedinělé výskyty zaznamenané v Rusku v oblasti Elkon district. V tomto případě je uranová mineralizace vázaná na starší Au-Ag zrudnění vyskytující se v krystalinickém basementu primárně budovaném metamorfity (jako jsou např. granulity, amfibolity, ruly) a felzickými granity představujícími pravděpodobný zdroj uranu. Hlavní nositel uranu je zastoupen v podobě branneritu, uraninitu a thoritu, jež jsou asociovány se zlatonosným pyritem ( $\pm$  markazitem).

Posledním zástupcem hydrotermálních metasomatických ložisek jsou **skarny**, které podobně jako K-metasomatity vytváří ložiska uranu spíše ve vzácných případech. Jediné popsané výskyty uranonosných skarnů představují ložiska Mary Kathleen (Austrálie) a Tranomaro (Madagaskar). V obou případech se jedná o komplexní mineralizaci zahrnující kromě uranu také Th, REE a Zr, jejichž zdrojem byla patrně intruze granitu. Nicméně vysoké koncentrace těchto inkompatibilních prvků ve skarnové mineralizaci dokládají významnou úlohu

fluoridových komplexů v hydrotermálních roztocích, které hrají zásadní roli pro remobilizaci „nemobilních“ prvků, jako jsou právě HFSE a REE.

### 3.2.2 Hydrotermální granitická ložiska

Jedná se o rozsáhlou skupinu středně- až nízkoteplotních uranových ložisek souvisejících s post-magmatickou, fluidy řízenou alterací granitických plutonů. Charakteristickým příkladem jsou nízkoteplotní hydrotermální ložiska asociovaná s **leukokratními peraluminickými granitoidními intruzemi** v rámci celého **variského orogenního pásma v Evropě**, zahrnující významná ložiska v Masiv Central a Armorickém masivu (Francie), Cornwallu (Anglie), Schwarzwald (Německo) a Krušných horách (Německo/Česko). Jednotlivá ložiska vznikala v relativně úzkém časovém intervalu v období permu, kdy docházelo k rozsáhlé infiltraci pánevních solanek a meteoritických fluid do krystalinického podloží a následné remobilizaci uranu z leukokratních na uran fertilních granitoidních plutonů. Tyto variské dvojslídne granity představují ideální zdroj uranu, jelikož hlavním nositelem uranu je primární magmaticky uraninit, který je snadno loužitelný při interakci s oxidačními hydrotermálními roztoky.

Na území České republiky byla v minulosti objevena a těžena významná ložiska uranu spadající do tohoto genetického typu. Jedny z nevýznamnějších zástupců představují ložiska **Jáchymov** a **Příbram**, kde byla velmi spolehlivě doložena blízká prostorová asociace se zdrojovou granitickou horninou v podobě fertilních dvojslídnych granitů. Naopak významná ložiska vyskytující se v **západomoravské uranové provincii** (např. Rožná–Olší, Slavkovice–Petrovice, Rozsochy, Brzkov) se vyznačují absencí potenciální zdrojové horniny uranu, jako jsou právě dvojslídne leukogranity. Avšak nejnovější studie prováděné v rámci projektu GeoBarr (Kubeš et al., 2021; Wertich et al., 2022) jednoznačně dokládají genetický vztah mezi hydrotermálními ložisky uranu v západomoravské uranové provincii a vysoce alkalickými **(ultra)draselnými plutony** spadajícími do tzv. durbachitové série, jež zaznamenaly rozsáhlou remobilizaci uranu a dalších inkompatibilních prvků v průběhu permského hydrotermálního eventy, a to podobně jako výše zmíněné výskyty fertilních granitoidních plutonů asociovaných s významnými evropskými ložisky uranu.

Stejně jako dvojslídne leukogranity představují (ultra)draselné horniny durbachitové série ideální zdroj uranu pro vznik významných ložisek, jelikož převážná část jejich vysokého obsahu uranu je vázána na primární magmatický uraninit, obvykle snadno rozpustný, a další na uran bohaté akcesorické minerály (např. thorit, zirkon, allanit) vykazující vysokou intenzitu

radiačního poškození v rámci krystalové struktury, které zákonitě umožňuje následnou hydrotermální alteraci a remobilizaci uranu a dalších nekompatibilních prvků (obrázek 2).

### 3.2.3 Hydrotermální vulkanická ložiska

Hydrotermální vulkanická ložiska obvykle souvisí s rozsáhlou pozdní hydrotermální alterací vulkanických komplexů, nejčastěji v podobě **kalder**. Kalderové komplexy mají vynikající schopnost produkovat velké množství vysoce frakcionované ryolitové taveniny, která se charakteristicky vyznačuje vysokými koncentracemi uranu a dalších inkompatibilních prvků. Navíc v důsledku velmi rychlé krystalizace ryolitových tavenin nedochází k hojně krystalizaci běžných akcesorických minerálů, jež zpravidla koncentrují dominantní část uranu obsaženého v hornině, a většina uranu je vázána ve vulkanickém skle vytvářejícím základní horninovou matrix. Při následné hydrotermální alteraci vysoce frakcionovaných ryolitů obvykle dochází k rozsáhlé **devitifikaci** (rozpuštění vulkanického skla), která má za následek odnos velkého množství uranu z těchto vulkanických hornin. V případě peralkalických ryolitových tavenin s vysokým stupněm depolymerizace (kapitola 2.1) může dojít k remobilizaci extrémního množství uranu v důsledku fluidy řízené alterace.

Navíc v podloží vulkanických kalder bývá obvykle přítomen mělký magmatický krb schopný **generovat hydrotermální fluida** přispívající k mobilizaci uranu. Rovněž tento magmatický krb v podobě mělké granitoidní intruze může představovat **dodatečný zdroj uranu** pro vznik hydrotermálních ložisek. Významnou roli při vzniku hydrotermálních vulkanických ložisek hraje také samotný **gravitační kolaps kaldery**, který má za následek vytvoření rozsáhlého zlomového a puklinového systému umožňujícího infiltraci a proudění mineralizačních fluid, nezbytných pro remobilizaci a transport uranu ze zdrojových hornin a následný vznik uranových ložisek.

Nejvýznamnějším světovým ložiskem tohoto typu je **Streltsovka kaldera** v Rusku obsahující přibližně 270 000 tun uranu při průměrné kovatosti 0,2 % U. Jedná se o křídový vulkanický komplex dotovaný naprosto rozdílnými zdroji uranu, jimiž jsou: 1. peralkalické ryolity, 2. fluida uvolněná z vulkanitů a podložního magmatického krbu, 3. podložní granitický basement a 4. starší ordovická mineralizace představující dodatečný zdroj uranu. Další významná světová ložiska jsou Dornot (Mongolsko), Kitts-Michellin a Rexpar (Kanada), Spor Mountain (USA) a Novazza (Itálie). Uranové zrudnění v rámci vulkanických ložisek se zpravidla vyskytuje v podobě hydrotermálních žil s masivním uraninitem, jehož charakteristickým rysem je vysoký

obsah zirkonia, které bylo pravděpodobně louženo společně s uranem při devitrifikaci vulkanického skla. Kromě zirkonia mohou frakcionované ryolity také představovat hojný zdroj fluoru, který je zcela zásadní pro mobilizaci HFSE a REE v hydrotermálních systémech.

### 3.2.4 Hydrotermální diagenetická ložiska

Tento genetický typ uranových ložisek obvykle úzce souvisí s **diagenními procesy** v rámci sedimentárních pánví, které zpravidla překrývají podstatně starší krystalinický basement. S ohledem na charakter a pozici samotné uranové mineralizace vyčleňujeme 3 hlavní subtypy: 1. tabulární, 2. kolapsové brekcie a 3. typ unconformity. Jednoznačně nejvýznamnějším typem jsou tzv. ložiska unconformity, která mohou dosahovat významných zásob uranu a navíc se vyznačují extrémně vysokou kovatostí uranové rudy (až 20 % U), nesrovnatelně převyšující ostatní vyčleněné typy uranových ložisek (tabulka 1). Pro zajímavost uvedme, že pouhá dvě „world-class“ ložiska typu unconformity (**Cigar Lake** v Kanadě a **Ranger** v Austrálii) přispěla v roce 2020 přibližně 13 % celosvětové produkce uranu.

Mechanismus vzniku ložisek typu unconformity obvykle souvisí s redukcí a akumulací uranu v blízkosti nesouhlasné hranice mezi paleoproterozoickými sedimentárními pánvemi a proterozoickým metamorfovaným podložím, kdy obvykle nastává rozsáhlá infiltrace **oxidačních pánevních solanek** do krystalinického basementu. V důsledku intenzivní interakce hydrotermálních fluid s metamorfovaným podložím dochází k vyvázání a **mobilizaci uranu z jeho primárních zdrojů**, zastoupených nejčastěji v **podobě akcesorických minerálů** (např. monazit, uraninit, thorit, allanit). Následná interakce mineralizujících fluid bohatých na uran s případným redukčním činidlem (např. tektonické zóny bohaté na grafit, hojné polohy sulfidů, horniny se značným zastoupením silikátů bohatých na  $Fe^{2+}$  atd.) vede k redukcí uranu, poté k jeho akumulaci a ke vzniku uranové mineralizace. Další možný genetický model ložisek typu unconformity představuje sedimentární pánev jako potenciální zdroj hydrotermálních fluid, ale rovněž i samotného uranu, který může být vázán na detritický materiál v rámci sedimentárního pokryvu (např. zirkon, fosfáty, uran adsorbovaný na jílový materiál). V tomto případě dochází k následné redukcí a ukládání uranu v důsledku mixingů oxidačních pánevních fluid nesoucích uran a redukčních fluid migrujících v rámci krystalinického basementu.

Světově nejvýznamnější ložiska (např. Cigar Lake, McArthur River, Rabbit Lake, Key Lake) tohoto typu jsou převážně situována v **Athabasca Basin** v Kanadě, případně v rámci **McArthur Basin** v Austrálii (ložisko Ranger). Dalším ložiskem typu unconformity je např.

Pasha-Ladoga v Rusku. V některých případech nemusí být sedimentární pokryv zcela zachován v důsledku intenzivní eroze, což má za následek úplné odkrytí krystalinického podloží s hostující uranovou mineralizací vázanou na tektonicky porušený metamorfovaný basement, jako je tomu v případě ložisek v Guyaně a Skandinávii.

### 3.2.5 Hydrotermální metamorfovaná ložiska

Geneze hydrotermálně metamorfovaných ložisek je obvykle spojena s relativně **nízkým stupněm metamorfózy sedimentárních formací**, kdy v důsledku zanoření a následné kompakce sedimentárních hornin dochází k derivaci hydrotermálních fluid, která poté cirkulují podél zlomových a puklinových systémů v rámci metamorfovaného horninového prostředí. Tato ložiska se zpravidla vyznačují stejnými PT podmínkami vzniku jako okolní metamorfované horniny, ve kterých jsou uložena. Zároveň hydrotermální metamorfovaná ložiska vykazují identické geochronologické stáří jako okolní metamorfity a chemické složení hlavních ložiskových minerálních paragenezí běžně reflektuje geochemii hostujících metamorfovaných formací.

Hlavními zástupci tohoto genetického typu jsou ložiska **Shinkolobwe** (Kongo) a **Mistamisk** (Kanada). V obou případech jsou uranová ložiska vázaná na metamorfované sedimentární sekvence v rámci epikontinentální platformy, jež představují pravděpodobný zdroj uranu. Zároveň v důsledku jejich metamorfózy mohou generovat oxidační solanky umožňující efektivní transport uranu, jehož následná akumulace a vznik uranové mineralizace bývají obvykle podmíněny mixingem s redukčními fluidy.

### 3.3 Infiltrační ložiska

Infiltrační ložiska, v zahraniční literatuře také běžně označovaná jako „**sandstone-hosted**“ mineralizace, jsou typickým příkladem **epigenetických ložisek** asociovaných s klastickými fluvialními, lakustrinními a deltovými sedimenty. Uranová mineralizace se obvykle vyskytuje ve středně- až hrubozrnných pískovcových polohách uložených v kontinentálním fluvialním nebo okrajovém mořském sedimentárním prostředí. Sekvence nepropustných jemnozrnných břidlic a jílovců se zpravidla střídají s mineralizovanými polohami pískovců.

Zásadní roli při genezi těchto typů ložisek obvykle hraje rozsáhlá **infiltrace oxidační meteorické vody** do sedimentárních formací, které zpravidla překrývají krystalinický basement. V důsledku intenzivní cirkulace oxidačních vod v krystalinickém podloží dochází

k vyvázání a mobilizaci uranu ze zdrojových hornin (např. felzických granitoidních intruzí) a tento je prostřednictvím mineralizujících roztoků transportován do nadložního sedimentárního pokryvu. Jelikož středně- až hrubozrnné pískovce představují ideální kolektor pro migraci hydrotermálních fluid, dochází k rozsáhlé cirkulaci uranonosných roztoků v rámci pískovcových poloh, jejich následné mineralizaci a vzniku ložisek v důsledku **interakce s redukčním činidlem**. Právě kontakt s redukčním činidlem hraje klíčovou roli při vysrážení uranu z hydrotermálních roztoků. Hlavní reduktanty mohou být zastoupeny v podobě: 1. hojného organického materiálu vyskytujícího se v rámci pískovcových poloh a na styku s nepropustnými jílovcí, 2. akumulace sulfidických minerálů, 3. uhlovodíků uzavřených v sedimentárních formacích a 4. vulkanického materiálu obsahujícího silikátové fáze bohaté na  $Fe^{2+}$ .

Podle charakteru a tvaru jednotlivých rudných těles v rámci pískovcových sekvencí dělíme infiltrační ložiska na několik dalších subtypů, z nichž ekonomicky nejvýznamnější jsou jednoznačně **tabulární ložiska** a tzv. **roll-front typ** mineralizace. Tabulární mineralizace se zpravidla vyskytuje v místech blízkého kontaktu mezi permeabilními pískovci a nepropustnými jílovcí a/nebo jílovými břidlicemi, kde nejčastěji vytváří deskovitá tělesa o proměnlivé velikosti. Naopak roll-front typ mineralizace se vyznačuje charakteristickým tvarem zrudnění připomínajícím písmeno C (*pozn. v angličtině označován jako C-shape*), jež je viditelné v průřezu mineralizované pískovcové polohy.

Hlavními nositeli uranu v mineralizovaných pískovcích jsou nejčastěji **uraninit** a **coffinit**, podstatná část uranu bývá rovněž vázána na oxidy a oxy-hydroxidy titanu, vanadáty, fosfáty a organickou hmotu. Jako vedlejší produkt (*tzv. by-produkt*) se z těchto zrudnění běžně získávají V, Se, Cu, Mo a Ag. V některých případech byly zaznamenány komplexní mineralizace s vysokým obsahem HFSE a REE, např. uranonosné pískovce v rámci české křídové pánve.

Podstatný význam infiltračních ložisek asociovaných s pískovcovými formacemi dokládají jejich celkové zásoby uranu pokrývající **přibližně 30 % všech světových zásob uranu**. Významná světová ložiska jsou převážně situována v USA ve státech Wyoming (Colorado Plateau) a Texas (Gulf Coast Plain), další neméně signifikantní světová ložiska zahrnují rozsáhlé výskyty v Kazachstánu, Uzbekistánu, Nigérii, Gabonu a JAR (Karoo Basin).

Ložiska tohoto typu byla v minulosti objevena a těžena rovněž na území České republiky, konkrétně se jednalo o severní část **české křídové pánve** na Liberecku. Jde například o ložiska Hamr (podle obce Hamr na Jezeře), Břevniště a Stráž (podle obce Stráž pod Ralskem). Pro

zajímavost uvedme, že i přes velké objemy vytěžených zásob uranu v těchto typech ložisek je potenciální zdroj uranu doposud stále neobjasněný.

### 3.4 Syn-sedimentární ložiska

U tohoto genetického typu se jedná o značně rozmanitou skupinu uranových ložisek, která často vznikají v naprosto rozdílném geologickém prostředí, nicméně jejich společným charakteristickým rysem je jejich syn-sedimentární až stratiformní povaha. V rámci syn-sedimentárních uranových ložisek se obvykle vyčleňuje několik různých subtypů na základě převládajících geologických procesů kontrolujících jejich genezi a celkový vývoj. Jedná se o ložiska vznikající 1. **mechanickým tříděním**, 2. **redoxním zachycením** a 3. **redox-chemogenními** procesy.

#### 3.4.1 Mechanické třídění

Významná uranová ložiska spojená s procesy mechanického třídění zahrnují tzv. **zlatonosné konglomeráty**, které jsou typickým představitelem stratiformních ložisek, v nichž se hlavní nositelé uranu (uraninit a brannerit) dominantně vážou na křemenné konglomeráty bohaté na pyrit. Ložiska spjatá se zlatonosnými konglomeráty zároveň představují průmyslově nejvýznamnější typ ložisek zlata, uran je zpravidla těžen jako možný by-produkt. Tato ložiska jsou obvykle vázána na bazální sekvence archaických a paleoproterozoických sedimentárních pánví, z genetického hlediska odpovídají metamorfovaným prekambriickým rozsypům. Zpravidla se jedná o uranová ložiska detritického původu vznikající mechanickým tříděním (*pozn. převzato z anglického termínu mechanical sorting*). Detritický původ ložisek odráží: 1. zaoblený tvar zrna hlavních na uran bohatých ložiskových minerálů, 2. identické geochronologické stáří jako okolní granity, ze kterých byl uraninit erodován, a 3. vysoké obsahy Th a REE v uraninitu, jež dokládají krystalizaci z magmatu – vazba na granity.

Nejvýznamnějším zástupcem tohoto typu je ložisko **Witwatersrand** (JAR), představující největší ložiskovou provincii Au-U ve světě. Vzhledem k výrazně nízkým kovatostem uranové rudy, která se pohybuje od 0,013 % do 0,06 % U, se uran v ložisku Witwatersrand těží jako možný by-produkt. Další významná světová ložiska jsou např. Elliot Lake (Kanada), Koli (Finsko) a Moeda (Brazílie).



### 3.4.2 Redoxní zachycení

Uranová ložiska vznikající redoxním zachycením uranu zahrnují **lignitová a uhelná** ložiska. Hlavním mechanismem vzniku těchto ložisek je cirkulace povrchových nebo podzemních vod nesoucích uran v rámci sedimentárních pánví obsahujících uhelné a/nebo lignitové polohy, které představují ideální redukční činidlo kontrolující redukci uranu a jeho následné vysrážení a akumulaci v podobě ložiska. Uran je nejčastěji adsorbován na organickou hmotu hojně obsaženou v rámci uhelných slojí, případně běžně dochází k redukci  $UO_2^{2+}$  v důsledku aktivity anaerobních bakterií. Uranonosná lignitová ložiska jsou známa například v Kazachstánu a Číně. Vyznačují se spíše menšími celkovými zásobami uranu, pohybujícími se obvykle od 20 000 do 50 000 tun uranu při relativně nízkých kovatostech (500–2 000 ppm).

### 3.4.3 Redox-chemogenní ložiska

Ložiska spjatá s redox-chemogenními procesy reprezentují **sedimentární fosfority**, které představují největší potenciální zdroje uranu (zhruba 15–22 milionů tun uranu) s nejnižší kovatostí, pohybující se v řádech desítek až nižších stovek ppm. Kvůli výrazně nízkým koncentracím uranu vázaného na mořské fosfority je tento genetický typ s ohledem na extrakci uranu **ekonomicky nerentabilní**.

Významná ložiska sedimentárních fosforitů jsou zpravidla vázaná na mělká šelfová moře v rovníkových oblastech. Největší světová ložiska fosforitů se nacházejí na pobřeží Maroka, Floridy, Chile a Venezuely. Ložiska sedimentárních fosforitů jsou primárně těžena za účelem výroby zemědělských hnojiv a celkové objemy uranu získaného z těchto ložisek se oficiálně nezveřejňují. Pro zajímavost zmiňme, že dřívější studie uvádějí, že zpracování fosforitů vytěžených z mělkých šelfových moří v okolí Floridy mezi lety 1975 a 1995 celkově vyprodukovalo přibližně 17 000 tun uranu. Navíc obvykle používaná zemědělská hnojiva, k jejichž výrobě sedimentární fosfority běžně slouží, mohou ve srovnání s průměrnými koncentracemi uranu vyskytujícími se v zemské kůře obsahovat relativně vysoké zastoupení uranu (10–200 ppm).

#### ❖ Zajímavost

Mořská voda vzhledem k enormním zásobám uranu ve světových oceánech rovněž představuje možný zdroj uranu – jde zhruba o 4 miliardy tun, což je dostatek uranu k uspokojení energetické spotřeby na Zemi na příštích 10 000 let. Avšak nízké obsahy uranu v mořské vodě

(3 ppb) znamenají technologickou výzvu pro ekonomicky efektivní způsob extrakce uranu z oceánů.

### 3.5 Ostatní

Vzhledem k enormním zásobám uranu (1 907 000 tun) představuje ložisko **Olympic Dam** nevýznamnější světové ložisko uranu, nicméně jeho původ a geologické procesy zodpovědné za jeho genezi nejsou doposud zcela objasněny. Z genetického hlediska se jedná o **IOCG typ mineralizace** spojené s intruzí tzv. **Roxby Downs granitu** a asociovaných felzických vulkanických produktů označovaných jako Gawler Range. Samotná uranová mineralizace je zpravidla vázaná na intenzivně brekciovitě a hematizované partie Roxby Downs granitu. Hlavními nositeli uranu jsou uraninit, coffinit a brannerit. Z hojně zastoupených sulfidických fází je obvykle přítomen chalkopyrit a bornit. Ložisko se zároveň vyznačuje vysokými koncentracemi REE, jejichž hlavní zdroje jsou přítomny ve formě REE-fluorkarbonátů (bastnäsit, parasit), monazitu a xenotimu. Geneze ložiska Olympic Dam je spojena s mixingem vysokoteplotních a salinních fluid derivovaných z granitického magmatu s oxidační meteoritickou vodou. Vliv oxidačních meteoritických fluid hrál zásadní roli při vzniku ložiska, jak také dokládá dominantní zastoupení Fe-oxidů v podobě hematitu namísto magnetitu. Mezi další na uran bohaté mineralizace typu IOCG patří dále ložiska Salobo (Brazílie) a Manxman a Oak Dam East (Austrálie).

## 4. Průzkum, těžba a využití uranu v ČR

Začátek období průzkumu a těžby uranu na území tehdejšího Československa můžeme sledovat ihned po konci 2. světové války, kdy se východní Evropa a část střední Evropy dostaly do sféry vlivu Svazu sovětských socialistických republik (SSSR). Po prvních testech a přímém nasazení jaderných zbraní ve vojenském konfliktu (svržení jaderných bomb na japonská města Hirošima a Nagasaki) potřeboval SSSR rychle pokročit ve vývoji svého jaderného arzenálu. A jelikož tehdy na území SSSR nebyl žádný aktivní důl na uranovou rudu, do hledáčku se dostalo světově známé **ložisko Jáchymov**, známé také výskytem uranové rudy či izolováním a popsáním nového radioaktivního prvku – radia (Marie Curie-Sklodovská, 1910). Historicky se zde uranová ruda nazývala německy spíše hanlivým pojmem „pechblende“ či česky „smolné blejno“ (odtud pak pocházejí používané názvy pro **nízkoteplotní hydrotermální uraninit** – **smolinec** či **pitchblend**). Přítomnost uranové rudy v ložisku totiž často značila vykliňování rudných žil se stříbrem. SSSR si poměrně rychle získal kontrolu nad jáchymovskými doly, těžbou a exportem uranové rudy. První jaderné testy a bomby vyvinuté na území SSSR tak nesou také jáchymovskou stopu. Pro zájemce o poválečnou těžbu uranu na území dnešní České republiky můžeme doporučit odbornější studie O. Pluskala či spíše populárně-naučnou publikaci F. Lepky (viz seznam literatury). Po obnovení těžby v ložiscích jáchymovského rudného revíru se průzkumné práce na vyhledávání ložisek uranové rudy rozšířily téměř po celém Českém masivu a vedly k nalezení poměrně velkého množství uranových ložisek.

### 4.1 Etapy průzkumu ložisek uranových rud

Samotný průzkum na uranové rudy probíhá v několika etapách. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé fáze ložiskového průzkumu, které **se vzájemně liší typem** i objemem průzkumných **prací** a metod, stejně jako **časovou a finanční náročností**. Ačkoli je zde pozornost věnována průzkumu zaměřenému na uranové rudy, podobné členění průzkumných prací platí i pro jiné typy ložisek nerostných surovin nebo částečně také pro vyhledávání vhodné oblasti pro ukládání vyhořelého jaderného paliva.

#### 4.1.1 První etapa – geologický výzkum

V první etapě se ještě nejedná o průzkum v pravém slova smyslu (není stanoveno průzkumné území, neprobíhají terénní průzkumné práce). V této fázi si průzkumná organizace teprve stanovuje cíle a prospekční či prognózní oblasti. Vychází z veřejně dostupných dat

o geologické situaci a ze zpráv o v minulosti provedených průzkumných pracích (využívá také geologické vědecko-výzkumné práce). Tato data pak nově interpretuje a porovnává se současným stavem znalostí o ložiskotvorných procesech, které se mohou podílet na vzniku ložisek užitkového nerostu.

Chce-li organizace postoupit dále, musí již před podáním žádosti o stanovení průzkumného území začít řešit i finanční otázku, tj. kde získá prostředky potřebné na průzkumné práce. Předběžně se už domlouvá s potenciálními investory (ať státem, či soukromými investory) na zárukách prvních potřebných finančních investic.

Organizace se v této etapě snaží získat co nejvíce podkladových dat pro podání žádosti o stanovení průzkumného území. Někdy může celá situace budit dojem, že se průzkumná organizace již zabývá konkrétní oblastí či ložiskem, aniž by měla schválené průzkumné území. Ovšem právě bez těchto dat, přesných plánů, kde bude průzkum probíhat, jaký nerost chce vlastně vyhledávat a jakým způsobem chce provádět průzkum, nemůže tento subjekt podat žádost o stanovení průzkumného území.

V této fázi **je finanční náročnost ještě velmi nízká** (v porovnání s následujícími etapami). Nicméně časová náročnost může být značná; např. v důsledku zdlouhavých legislativních kroků vedoucích k udělení průzkumného území.

#### **4.1.2 Druhá etapa – povrchový průzkum, mapování**

Druhou etapu lze označit termínem povrchový průzkum. Ten se za pomoci mapovacích technik **snaží lokalizovat či upřesnit polohu ložiska**. Vyhledávání uranových ložisek je ve srovnání s jinými surovinami mírně zvýhodněno díky radioaktivitě uranových minerálů, která způsobuje anomálie v porovnání s hodnotou přirozené radioaktivity v okolí. Právě objevení, specifikace a ověření těchto anomálií jsou primárním cílem této etapy průzkumu.

Jedná se jak o klasické geologické mapování, tak o mapování specializovanější, zaměřené na identifikaci hornin, struktur a uranové či doprovodné mineralizace. Důležitou součástí je rovněž **geochemické a geofyzikální** (především radiometrické) **mapování**. V současnosti se mnohdy nejprve využívá letecké geofyzikální mapování, při němž letadlo či helikoptéra nesoucí měřicí přístroje přelétávají v nižších výškových hladinách po přesně stanovených liniích a kontinuálně zaznamenávají data. V minulosti se v této etapě na území Českého masivu často aplikoval také tzv. autogama průzkum, kdy byly detektory vezené v autech schopny zachytit radioaktivitu a kontinuálně zaznamenávat naměřené hodnoty. Po objevení anomálií se pak aplikují měření

v detailnějším měřítku na již vymezených oblastech. Linie pro geofyzikální měření jsou navrženy s menšími rozestupy a jsou už „natahovány“ přímo člověkem v terénu.

Metod, kterých se při geofyzikálním průzkumu používá, je více. Opíráme se především o údaje **gravimetrické** (rozdíly v hustotě hornin, tíhové anomálie), **magnetometrické** (rozdíly v síle magnetického pole různých hornin) nebo **geoelektrické** (odlišné chování elektrického pole v různém prostředí). Tyto techniky, používané spíše v prvních fázích průzkumu, mohou detekovat povrchové i podpovrchové struktury, tělesa, zlomy, zlomová pásma nebo kontakty hornin. V poslední době se také využívají **seismické metody**, kdy vybuzením a zpětným zachycením seismického signálu můžeme získat obraz podpovrchových struktur a kontaktů.

V průzkumu ložisek uranu jsou nejdůležitější a nejvyužívanější radiometrické metody, schopné detekovat přirozenou radioaktivitu hornin a minerálů a identifikovat radiometrické anomálie, které mohou být projevem akumulace minerálů obsahujících uran. Nejběžnější radiometrickou technikou je **gama průzkum – gamaspektrometrie**, která měří **koncentrace uranu, thoria a draslíku**, jež představují přírodní radioaktivní zářiče. Druhou je pak emanační průzkum, který měří obsahy plynu radonu v přívěrchových částech.

Jsou-li při leteckém mapování nalezeny radiometrické anomálie, přistoupí se k detailnějšímu mapování těchto oblastí. Používá se jak účelové geologické mapování, tak podrobnější geofyzikální měření. K tomu slouží například i sondy do několika prvních metrů, kopné sondy a rýhy, které umožní mapovat a měřit horniny jinak zakryté vrstvou půdy. Součástí této etapy mohou být někdy i **první mělčí vrty** (desítky metrů), které ověřují pokračování nalezených anomálií či struktur do hloubky. Popsané geofyzikální metody lze aplikovat i ve vrtech – tzv. **karotážní měření**.

Tato etapa ještě není tak finančně náročná ve srovnání s následujícími etapami (vrtným průzkumem, či dokonce průzkumem pomocí důlních děl). V závislosti na velikosti průzkumného území (většinou od několika km<sup>2</sup> až po desítky km<sup>2</sup>), komplexnosti použitých metod a objemu průzkumných prací se náklady na tuto etapu mohou řádově lišit. **Časová náročnost** opět závisí na stejných podmínkách, přesto ani v případě menšího průzkumného území nebude kratší **než několik let**. Do časové náročnosti všech etap se musí také započítat doba potřebná k vyhodnocení a interpretaci nově získaných dat, která je většinou delší než samotný průzkum a získání dat.

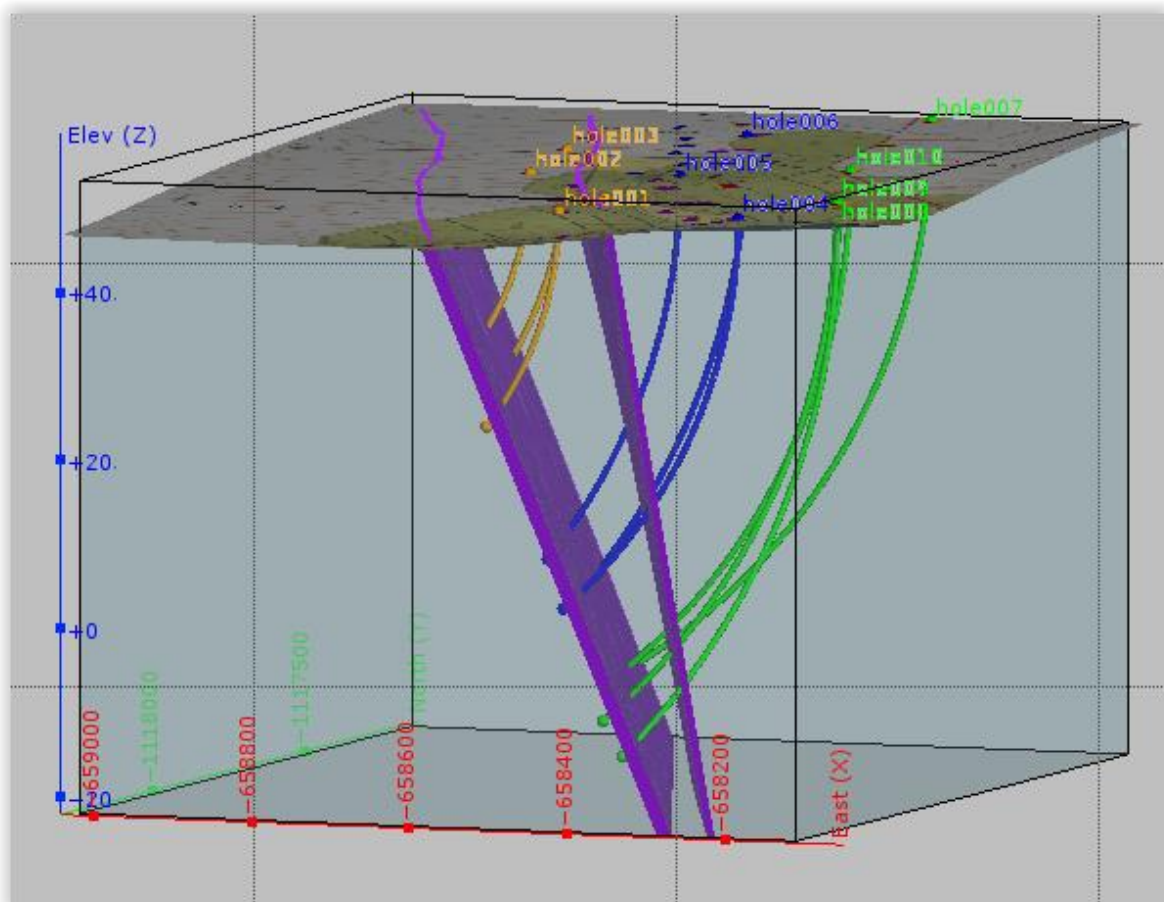
### 4.1.3 Třetí etapa – vrtný průzkum

Třetí etapa přímo navazuje na druhou. Přesto je nutné ji vyčlenit, neboť právě **třetí etapa** je velmi důležitá a také **nejrizikovější**, jelikož pouze vrty se může **ověřit hloubkový vývoj** nalezených (či předpokládaných) rudných struktur. Vysoké riziko spočívá v tom, že právě na ověření uranové mineralizace do hloubky závisí úspěch celého průzkumu. Jádrové vrtání je navíc **finančně velice nákladné**. Cena se odvíjí především od hloubky plánovaného vrtu (mělčí vrty jsou levnější, hlubší dražší). Ceny nejsou jednotné, vždy záleží na konkrétní geologické situaci či technologii vrtání apod. Cena za jeden metr jádrového vrtání hlubšího vrtu v krystalických horninách se může pohybovat kolem 3 000–4 000 Kč a více (v ceně je zahrnuta veškerá obsluha a manipulace s vrtnou soupravou). Množství všech odvrtných jádrových vrtů může podle velikosti a komplexnosti ložiska nebo počtu vrtů dosáhnout celkové délky od jednotek po desítky až stovky kilometrů u rozsáhlých ložisek.

Existují různé techniky vrtání. V rudném průzkumu, obzvláště u komplikovaných struktur, se používá především **jádrové vrtání (diamond drilling)**. Jeho výhodou je získání maximální geologické informace (může se použít i tzv. technologie orientovaného jádra). Velkou nevýhodou je vysoká cena (zmiňovaná výše) a velká časová náročnost.

Pro správné určení polohy vrtu potřebujeme co nejvíce informací z povrchu. Dosahuje-li rudná struktura až k povrchu, pak je pro správné naplánování a vedení vrtů nutné zjistit její směr, úklon a další parametry. Dále se obvykle vychází z linií méně hlubokých vrtů, které by měly zastihnout strukturu při povrchu a dále ověřit, jak se mění její parametry. Pokračuje se liniemi dalších vrtů, které jsou už projektovány do větších hloubek a mají stejný úkol. Teoretickou situaci při průzkumu ložiskových těles protáhlého deskovitého tvaru si můžeme popsat na **teoretickém 3D blokdiagramu** (obrázek 4). Fialová deskovitá tělesa se subvertikálním úklonem představují předpokládaný průběh rudného tělesa na základě měření z povrchu. Vrty zobrazené oranžovou barvou představují první linii mělčích vrtů, které ověřují pokračování rudného tělesa pod povrchem. Pokud tyto vrty úspěšně ověří pokračování rudného tělesa, navrhuje se další linie vrtů (v našem případě zobrazené modře), které jsou naplánovány tak, aby protuly rudné těleso ve větší hloubce. Pokud se ověří, že rudná struktura pokračuje dále do hloubky, může následovat další linie vrtů (zobrazená zeleně), jež míří ještě hlouběji. Druhým důležitým cílem je pak pomocí vzorkování a analýz vrtných jader (a případně dalších doplňujících vrtů) provést první vyhodnocení kovnatosti, množství zásob a dalších důlních/metalurgických charakteristik. Tyto závěry jsou zlomovým bodem každého projektu,

neboť právě podle nich se rozhoduje, zda se projekt dá označit za ekonomický a může tak postoupit do další fáze.



**Obrázek 4.** Teoretický 3D blokdiagram zobrazující vrtný průzkum protáhlého deskovitého tělesa (Wertich, 2016)

#### 4.1.4 Čtvrtá etapa – průzkum pomocí důlních děl, studie proveditelnosti

Pokud se závěry plynoucí z vrtného průzkumu (předchozí etapa) vyhodnotí jako **ekonomicky výhodné** (tzn. předběžně vypočítané zásoby/zdroje jsou dostatečně velké), projekt se přesune do další fáze průzkumu. K dalším zpřesňujícím vrtům se v minulosti mnohdy přidával tzv. **průzkum pomocí důlních děl**, který je souborem hornických prací (šachty, šachtice, štoly, následné podzemní vrty atd.). Tyto práce násobně zpřesňují geologickou situaci komplikovaných rudných struktur, mohou dodat data k přesnějšímu výpočtu zásob a otestovat geotechnické podmínky pro ražení chodeb v dole či velkoobjemové vzorky pro metalurgické testy. Následné zpracování a úprava rudy ukáží, jakou míru výtěžnosti můžeme při těžbě očekávat.

Etapa průzkumu pomocí důlních děl už dnes často není součástí průzkumných projektů. Mnoho z nich končí fází intenzivního vrtného průzkumu. Důvodem je vysoká finanční, časová a legislativní náročnost (jedná se již o vybudování infrastruktury, ražbu podzemních prostor apod.). Náklady na tuto část průzkumu by totiž ve většině případů přesáhly veškeré dosud vložené investice, což investora odradí. Dá se říci, že tato etapa navazuje na dokončený a vyhodnocený průzkum ložiska, který potvrdil ekonomické zásoby suroviny. Bez schválených zásob a udělení těžební licence by dnes organizace o tak nákladné etapě průzkumu neuvažovala.

Podstatné je vytvoření kvalitní **studie proveditelnosti (feasibility study)**, ve které jsou řešeny kromě geologicko-průzkumných i všechny ostatní aspekty důležité pro případné využití ložiska. Studie obsahuje zpřesněné výpočty zásob, údaje o kovnatosti jednotlivých částí ložisek, technické parametry a data týkající se **technologie těžby a geometalurgie** (charakteristiky celého řetězce zpracování suroviny). Neméně důležitou součástí studie ale musí být také celkové **ekonomické, sociální a environmentální faktory** včetně studie EIA (Environmental Impact Assessment). Pokud se organizaci (a jejím investorům) po začlenění všech aspektů projekt stále jeví jako ekonomicky výhodný, je možné poustoupit dále k žádosti o udělení těžební licence. Součástí této žádosti jsou veškerá výše uvedená hlediska.

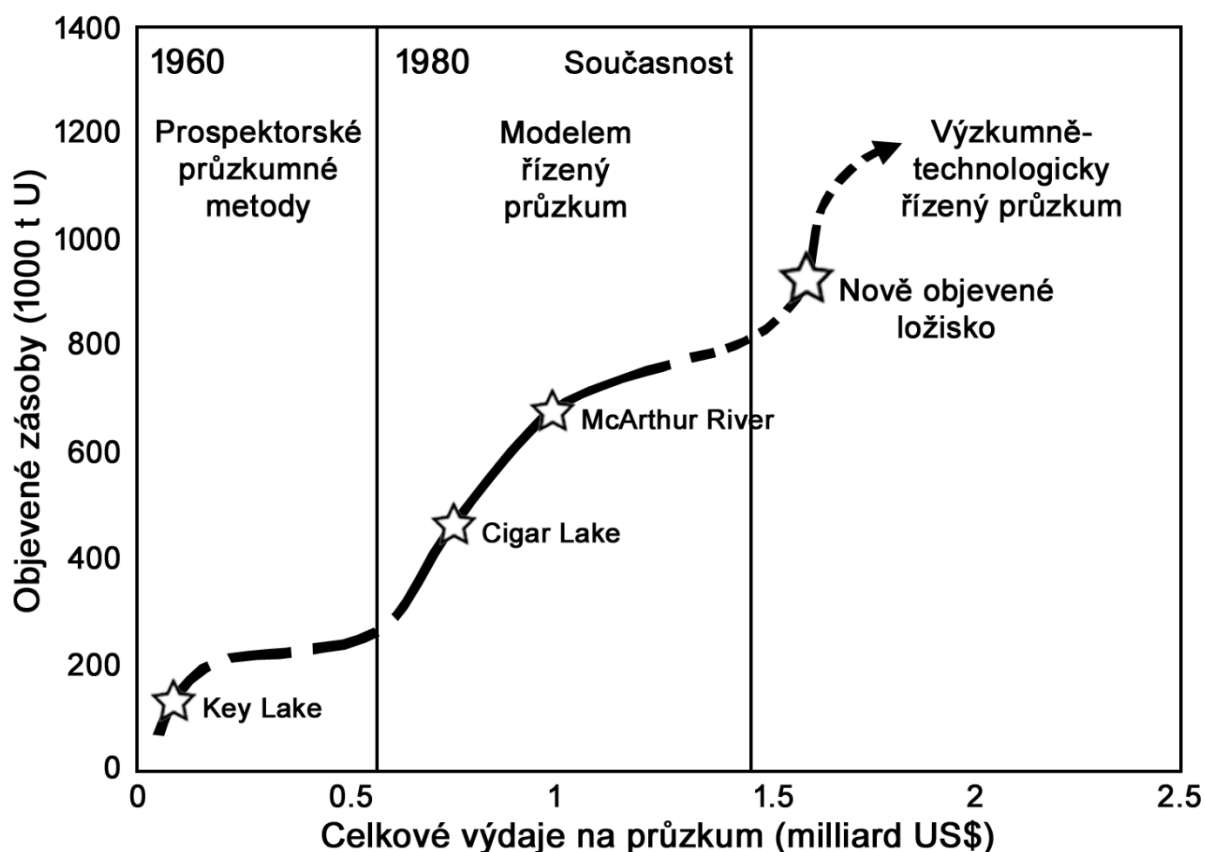
#### 4.1.5 Průzkum uranových ložisek – závěr

Cílem předcházejících kapitol o etapách ložiskového průzkumu bylo poukázat na jejich komplexnost a časovou i finanční náročnost. Několikrát byla zmíněna také **vysoká rizikovitost investice**. Ta je v ložiskovém průzkumu opravdu značná, obecně se udává, že celosvětově se úspěšnost ložiskového průzkumu – tedy pravděpodobnost, že se z průzkumného projektu stane aktivní důl – pohybuje kolem 1 % či ještě méně.

V oblasti Českého masivu probíhal v průběhu druhé poloviny 20. století intenzivní průzkum zaměřený na vyhledávání ložisek uranové rudy i dalších typů rud/nerud. Většina **průzkumů a mnohé doly skončily v roce 1989** nebo krátce poté a od té doby neproběhlo mnoho prací na poli průzkumu na uranové rudy (ani na jiná rudná ložiska). Je pravděpodobné, že většina jednodušejí naležitelných ložisek (např. ložiska zasahující až na povrch, rozšiřování stávajících známých ložisek atd.) již byla objevena. Avšak **možnost nálezu dalších ložisek** i v prostoru Českého masivu **určitě není vyloučena**. Pro jejich možné nalezení by bylo vhodné držet se aktuálních trendů v průzkumu nerostných surovin a využít novou metodiku, strategie a technologie. Na druhou stranu je potřeba si uvědomit, že finanční náročnost prací vedoucích k objevení těchto ne tak snadno naležitelných ložisek bude také vyšší. Tuto teorii si můžeme



znázornit na **příkladu vývoje průzkumu ložisek uranu** v kanadské ložiskové provincii Athabasca Basin (viz kapitola 3.2.4). Obrázek 5 ukazuje křivku porovnávající finanční aspekty, velikost nalezených ložisek uranu, strategie průzkumu a časové hledisko ložiskového průzkumu a objevů v této provincii. Obrovská světově významná ložiska, jako jsou např. Cigar Lake nebo McArthur River, byla nalezena až po aplikaci tzv. modelem řízeného průzkumu, při němž byl vytvořen regionálně platný model popisující zdroje uranu a faktory ovlivňující mechanismy jeho vyvázání, mobilizaci, transport a akumulaci ve formě ložisek nerostných surovin (kapitola 2). Pochopení uvedených závislostí pak vedlo k objevům velkých ložisek, avšak zvyšovaly se i celkové výdaje na objevení těchto ložisek. Dá se říct, že na území České republiky byly v minulosti aplikovány **pouze metody prospektorského průzkumu**. Definování a aplikace **modelem řízeného průzkumu** a využití nových technologií by i zde mohly vést k objevu **nových ložisek**.



*Obrázek 5. Graf vývoje ložiskového průzkumu v kanadské oblasti Athabasca Basin (upraveno podle Cuney a Kyser, 2009)*

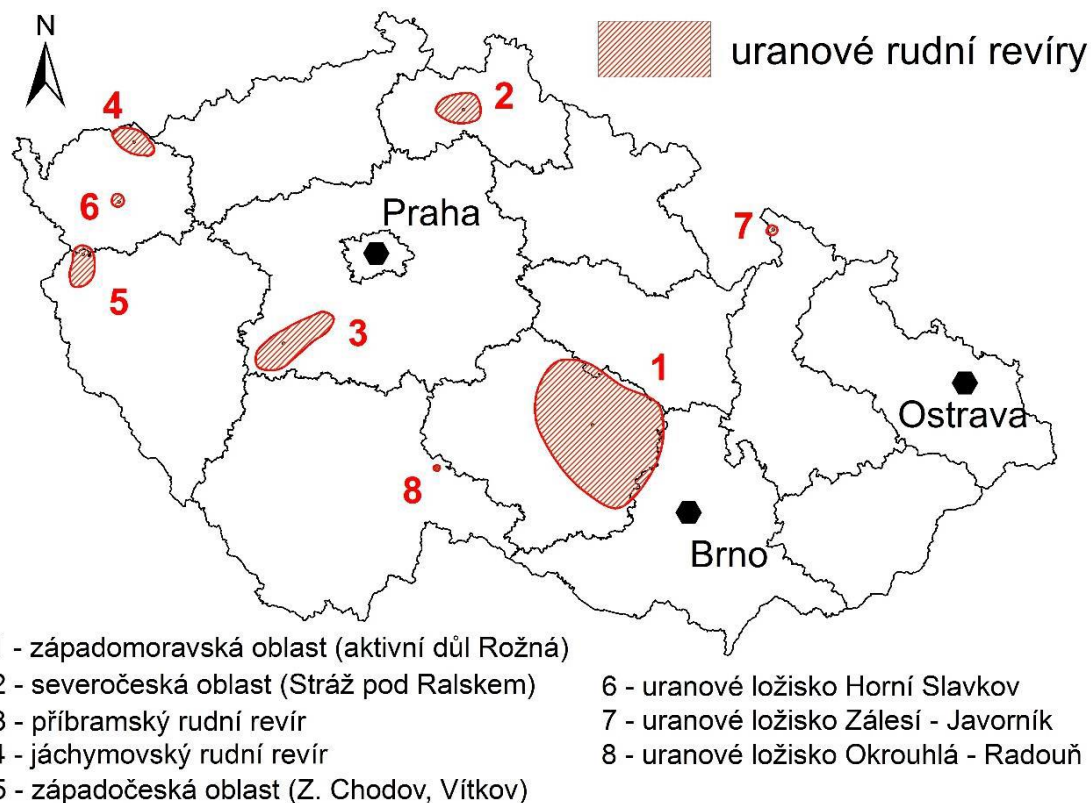
## 4.2 Těžba uranu na dnešním území ČR

Uran se na území ČR těžil od roku 1946 (viz kapitola 4), s centrem v **jáchymovském a hornoslavkovském rudném revíru** (obrázek 6), kde byla těžena hydrotermální granitická ložiska. Později se centrum těžby přesunulo do **příbramského rudného revíru** (taktéž hydrotermální granitické ložisko) a do **severočeské uranové oblasti**, kde byla v lokalitách Hamr, Břevniště, Stráž a dalších těžena tzv. infiltrační ložiska (sandstone-hosted) – viz kapitola 3.3. Těžba v této oblasti ale v naprosté většině případů neprobíhala podzemním způsobem jako u předešlých oblastí, ale tzv. metodou „in-situ leaching“ – tedy získáváním uranu přímo z ložisek pomocí vrtů a rozpouštěním uranových fází pomocí kyselého loužení, které způsobilo poměrně rozsáhlou kontaminaci zdrojů podzemní vody. Pro zajímavost je možné uvést, že při dekontaminaci této oblasti se stále získává menší množství uranu (okolo 20–30 tun ročně). V této oblasti jsou stále registrovány poměrně velké zásoby uranu, které by však musely být dobývány určitou formou „in-situ leaching“, což je nyní z environmentálních důvodů neproveditelné.

Kromě výše zmíněných ložisek byly průzkumem objeveny další ložiskové oblasti a následně těžena další spíše menší ložiska (obrázek 6). Jedná se o **západočeský rudný revír** (např. ložisko Vítkov, Zadní Chodov), uranové **ložisko Okrouhlá Radouň**, vázané na centrální moldanubický pluton (poblíž Jindřichova Hradce), a ložisko **Zálesí v Rychlebských horách** (Slezsko), které bylo podobně jako ložiska Jáchymov či Horní Slavkov tvořeno tzv. pětiprvkovou formací (U-Ag-Bi-Ni-Co). Podle genetického typu uranových ložisek popsanych v těchto výukových skriptech by se ve všech zmíněných případech jednalo o hydrotermální granitická ložiska.

Od roku 1957 začala produkce uranu v **západomoravském rudném revíru** (obrázek 6), zejména z ložisek Rožná a Olší (nejspíše jde také o hydrotermální granitická ložiska). Ložisko Rožná bylo v této oblasti posledním aktivně těženým uranovým ložiskem v ČR, poslední produkce z tohoto hlubinného dolu proběhla v roce 2017. Od té doby dochází k postupnému řízenému zaplavování dolu, plánovanému až po úroveň 12. patra. V současnosti zde probíhají experimenty v podzemním výzkumném pracovišti (PVP) Bukov pro ověřování technologií budoucího hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva.

Kumulativně bylo na našem území do roku 2020 vyprodukováno 112 229 tun uranu, díky čemuž se Česká republika stále drží na 12. místě světového žebříčku zemí podle celkového množství vyprodukovaného uranu.



**Obrázek 6.** Lokalizace uranových rudných revírů a samostatných ložisek (Dančák et al., 2015)

### 4.3 Využití uranu na území ČR

Na území České republiky stále stojí dvě produkční centra (úpravna rudy v Dolní Rožínce a ve Stráži pod Ralskem) schopná upravovat uranovou rudu na obchodovatelný produkt. Finálním produktem úpravny v Dolní Rožínce je **diuranát amonný**  $((\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7)$ , kterému se kvůli jeho sytě žluté barvě říká také „**žlutý koláč**“. Ten je meziproduktem pro výrobu jaderného paliva, palivových tyčí do jaderných elektráren. Zde je však uranový hodnotový řetězec v České republice přerušen. Diuranát amonný vyrobený z vytěženého uranu se prodává výrobcí jaderného paliva a palivové tyče do českých jaderných elektráren nakupuje provozovatel ze zahraničí. Samotná výroba jaderného paliva je na základně mezinárodních dohod omezena pouze na několik zemí na světě. Dlouhou dobu se jaderné palivo nakupovalo u ruské společnosti TVEL, v současné době se provozovatel českých jaderných elektráren (ČEZ, a. s.) z geopolitických důvodů domlouvá na budoucích dodávkách jaderného paliva od amerického koncernu Westinghouse. Česká republika provozuje 2 jaderné elektrárny: novější JE Temelín v jižních Čechách se dvěma reaktory VVER-1000 (každý reaktor je navržen na výkon 1 080 MWe) a starší JE Dukovany situovanou na jihozápadní Moravě se 4 reaktory VVER-440

(každý reaktor je optimalizován na výkon 510 MW). Dlouhodobá průměrná spotřeba uranu pro jaderné palivo do českých jaderných elektráren je 675 tun uranu za rok.

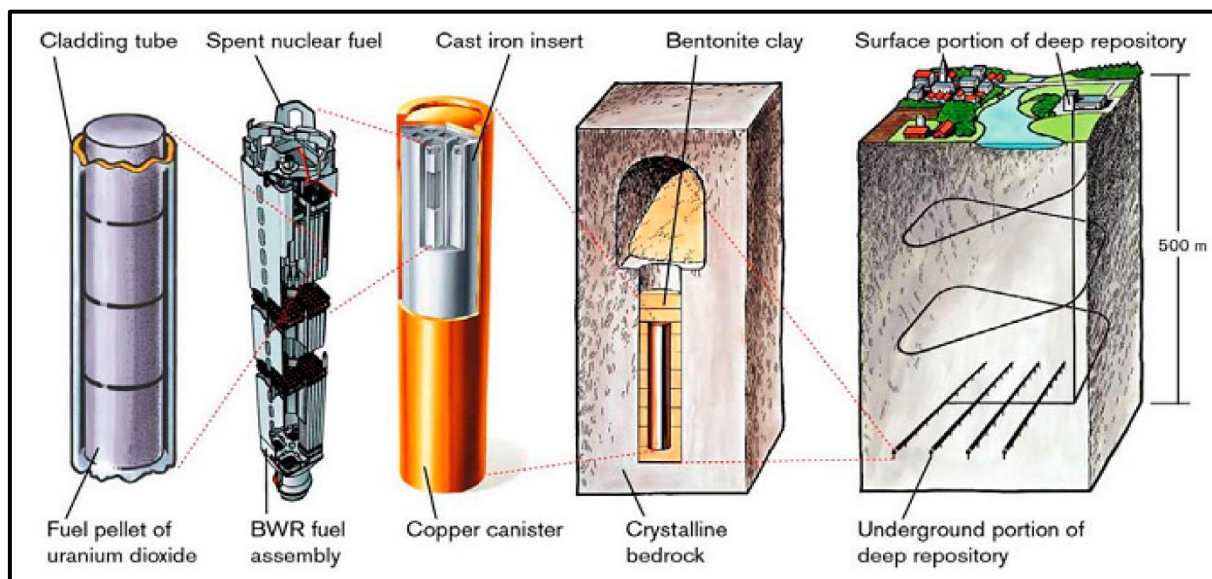
Energetická koncepce České republiky nadále počítá s jadernou energií jako hlavním stabilním zdrojem elektrické energie, což dokládá například ambiciózní cíl státní energetické politiky dosáhnout 50% podílu produkce elektřiny z jaderných elektráren. V současnosti jaderné elektrárny pokrývají přibližně 34 % spotřeby. Společnost ČEZ, a. s., hodlá v roce 2024 vybrat dodavatele, s nímž podepíše smlouvu na dostavbu 2 nových bloků v elektrárně Dukovany (EDU II). Rozpracovány jsou také koncepty dostavby reaktorů v jaderné elektrárně Temelín či zavedení tzv. malých modulárních reaktorů. Rovněž koncepce surovinové politiky České republiky považuje uran za tzv. superstrategickou surovinu státu a navrhuje jeho využití pro zajištění dodávek primární suroviny pro výrobu jaderného paliva.

## 5. Koncept ukládání vyhořelého jaderného paliva

Celý uranový cyklus zákonitě uzavírá bezpečné a dlouhodobé nakládání jednak s vyhořelým jaderným palivem, jednak s dalšími typy radioaktivních odpadů, které vznikají v různých odvětvích lidské činnosti. **Radioaktivní odpady** jsou obecně definovány jako látky, materiály nebo předměty s vyšším obsahem radionuklidů, u kterých se nepředpokládá další využití a které jejich vlastník nebo Státní úřad pro jadernou bezpečnost za odpad prohlásí. Mezi původce a **producenty radioaktivního odpadu** nepatří pouze jaderné elektrárny, ale i výzkumné a školní instituce se zdroji ionizujícího záření ve zdravotnictví, výzkumu a průmyslu. Pro zajímavost uvedme, že radionuklidový zářič se používá například při výrobě nápojů v plechovkách jako součást ukazatele, který kontroluje výšku hladiny v obalu. Relativně velké množství tzv. přechodně aktivního odpadu se vytváří rovněž ve zdravotnictví, jedná se především o odpady z nemocnic, které vznikají při aplikaci radiofarmak nebo při použití radiodiagnostických metod (např. pleny a buničina), a také o některé odpady (např. ochranné pomůcky). Radioaktivní odpady tohoto typu bývají skladovány po dobu maximálně 5 let v tzv. vymíracích komorách. Po uplynutí zmíněného časového intervalu dochází k úplnému rozpadu nebezpečných krátkodobých radionuklidů a jejich aktivita je srovnatelná s aktivitou okolního prostředí, takže s těmito odpady může být nakládáno jako s komunálním odpadem.

S ohledem na složení a charakter radioaktivních odpadů, zejména na zastoupení různých radionuklidů s odlišným poločasem rozpadu, se rozlišují 3 základní typy: 1. **nízkoaktivní**, 2. **středněaktivní** a 3. **vysokoaktivní odpady**. Nízkoaktivní odpady obsahují omezené množství radionuklidů s relativně krátkým poločasem rozpadu, a proto je možné jejich ukládání i v povrchovém úložišti. Středněaktivní odpady zahrnují významné množství dlouhodobých radionuklidů, jako je například plutonium, a proto je třeba je oddělit od okolního prostředí s vyšším stupněm izolace než nízkoaktivní odpady – za tímto účelem smějí být ukládány pouze do podzemních úložišť. Vysokoaktivní odpady obsahují velké množství radionuklidů generujících zbytkové teplo. Tento typ odpadů bude společně s vyhořelým jaderným palivem, až bude prohlášeno za odpad, uložen v hlubinném úložišti realizovaném pro účely dlouhodobého a bezpečného ukládání vyhořelého jaderného paliva (obrázek 7). Nízko- a středněaktivní odpady tvoří převážnou část radioaktivních odpadů, které v České republice v současnosti vznikají. Radionuklidy v nich obsažené mají poločas rozpadu v řádech desítek až stovek let (např. izotop vodíku  $^3\text{H}$  s poločasem rozpadu 12 let, izotop cesia  $^{137}\text{Cs}$  s poločasem

rozpadu 30 let). Tyto odpady bývají momentálně ukládány v úložištích Bratrství, Richard a Dukovany pod záštitou **Správy úložišť radioaktivního odpadu (SÚRAO)**.



**Obrázek 7.** Multibariérový koncept hlubinného ukládání vysoce aktivního jaderného paliva, zahrnující kombinaci inženýrských a geologických bariér k zabránění úniku radionuklidů do okolního hornového prostředí. Obrázek převzat z práce SKB (2011)

Z geologické perspektivy je tedy nezbytné zvážit několik důležitých faktorů, které mají signifikantní impakt na realizaci hlubinného úložiště v horninovém prostředí: 1. zastoupení a charakter hlavních radionuklidů v radioaktivních odpadech, 2. to, jak se v průběhu geologického času bude měnit jejich zastoupení, 3. geochemickou stabilitu radionuklidů v geologickém prostředí a 4. produkci tepla uloženým radioaktivním odpadem. Důležitou výzvou pro geology zabývající se otázkou realizace hlubinného úložiště je zejména pochopení podmínek **dlouhodobého vývoje hlubinného úložiště**, jež jsou spjaty s **geochemií a mobilitou zastoupených radionuklidů**, rovněž se měnících v průběhu geologického času. Rozpad určitého radionuklidu zákonitě vede k akumulaci jiného radionuklidu. Například plutonium  $^{239}\text{Pu}$  s vlastním poločasem rozpadu 24 100 let se v rámci své rozpadové řady rozkládá na dceřiné produkty zahrnující třeba uran  $^{235}\text{U}$  s poločasem rozpadu 700 milionů let.

Navíc v případě vyhořelého jaderného paliva hraje důležitou úlohu také typ samotného paliva a celková doba od jeho vyjmutí z jaderného reaktoru, které společně ovlivňují zastoupení radionuklidů a množství vyprodukovaného tepla. Přepřacování vysokoaktivních odpadů snižuje obsah radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu (např. uranu  $^{238}\text{U}$ ), avšak zanechá zvýšené koncentrace krátce existujících produktů (např. cesium  $^{137}\text{Cs}$ , stroncium  $^{90}\text{Sr}$ ), které generují

velké množství tepla, což určuje, jak dlouhou dobu musí být radioaktivní odpad ponechán v povrchových úložištích kvůli jeho chlazení, než dojde k finálnímu hlubinnému uložení.

Koncept hlubinného ukládání vyhořelého jaderného paliva zahrnuje **multibariérový systém** ochrany biosféry před průnikem radionuklidů z dlouhodobě ukládaného jaderného odpadu. Tento ochranný systém představuje využití série rozdílných typů bariér (obrázek 7), jejichž hlavním cílem je buď zamezit, anebo alespoň snížit uvolňování radionuklidů do okolního horninového prostředí. Za předpokladu, že se jedna z využitých bariér stane méně efektivní, než bylo původně předpokládáno, ostatní bariéry mohou okrajově zastoupit její funkci a zabránit tak potenciálnímu úniku radionuklidů. Zpravidla se využívá 2 hlavních typů ochranných bariér: 1. **inženýrských** a 2. **geologických**.

### 5.1 Inženýrské bariéry

Základní komponentou v rámci multibariérového hlubinného ukládání vyhořelého jaderného paliva jsou inženýrské bariéry, mezi které patří: 1. **ukládací obalový soubor**, 2. **těsnicí a tlumicí bariéra (buffer)** v ukládacím vrtu okolo obalového souboru a 3. **výplň ostatních podzemních prostor (backfill)**. Vyhořelé jaderné palivo v podobě relativně malých slisovaných pelet dominantně tvořených  $UO_2$  je uskladněno do tenkých palivových tyčí skládajících se z antikoročních slitin, které jsou následně umístěny v železných držácích do samotného ukládacího souboru (obrázek 7). Tyto ukládací soubory jsou obvykle vyrobeny z **antikoroční oceli** a jiných materiálů (např. měděné obalové soubory) zabraňujících degradaci těchto souborů při interakci s podzemní vodou a jinými hydrotermálními roztoky, jejichž infiltrace může vést k uvolňování radionuklidů z vyhořelého jaderného paliva do životního prostředí. Rovněž se běžně využívají dvouplášťové ukládací obalové soubory, kdy vnější obal bývá vyroben z uhlíkové oceli, zatímco vnitřní pouzdro je tvořeno antikoroční ocelí. Pro zajištění radiační ochrany jsou obalové soubory navrženy tak, aby jejich těsnost (nepropustnost) spojená se zamezením úniku radionuklidů byla zachována jak v provozní fázi, tak v **dlouhodobém časovém horizontu po dobu tisíců let**. Životnost obalového souboru je zajištěna nejen volbou materiálu vlastního obalového souboru, ale i ostatních inženýrských bariér a jejich vzájemnou interakcí.

**Bariéra s těsnicí a tlumicí funkcí**, odborně označovaná jako **buffer**, bývá zpravidla umístěna okolo ukládacího obalového souboru ve vrtu (obrázek 7). Hlavní funkcí bufferu je ochrana ukládacího obalového souboru a retardace migrace radionuklidů v případě jeho porušení. Pro

zajištění požadavků dlouhodobé bezpečnosti při ukládání vyhořelého jaderného paliva musí být i ostatní **prostory hlubinného úložiště uzavřeny výplňovým materiálem (backfillem)**. V současnosti je velká pozornost věnována výzkumu a testování **bentonitu** (jílová hornina vznikající zvětráváním vulkanických produktů) jakožto vhodného materiálu pro využití ve formě bufferu a/nebo backfillu. Bentonit byl vybrán na základě jeho výborných těsnicích schopností (zejména kvůli velmi **nízké propustnosti a bobtnací schopnosti**), které zajistí uzavření všech technologických mezer jako potenciálních migračních drah pro podzemní vodu a jiné hydrotermální roztoky představující efektivní činidla pro odnos radionuklidů z vyhořelého jaderného paliva. Další významnou vlastností bentonitu je **schopnost sorbovat**, eventuálně retardovat radionuklidy, a zabránit tak jejich možnému úniku do životního prostředí a biosféry. Pro správnou funkci těsnicích a tlumicích bariér v hlubinném úložišti je nezbytné zhutnění bentonitu, čímž se zákonitě stane méně propustným, kromě toho více bobtná a je odolnější vůči vnějším vlivům.

## 5.2 Geologické bariéry

Jednou z nejdůležitějších bariér je samotný horninový masiv, v jehož hloubce okolo 500 m pod povrchem bude samotné úložiště realizováno (obrázek 7). Jelikož tento typ přírodní geologické bariéry zásadně ovlivňuje chování uranu a dalších radionuklidů v horninovém prostředí, kontroluje tak jejich zadržení nebo případnou mobilitu v rámci horninového masivu. K posouzení vhodnosti určitého horninového prostředí pro vybudování hlubinného úložiště bývají obvykle sledovány následující parametry zájmového území: 1. **litologické složení a geochemický charakter hornin**, 2. **vzájemný vztah horninových komplexů**, 3. **lokalizace a charakter křehkého porušení hornin** (např. pukliny, zlomová pásma), 4. **hydrogeologické poměry** a 5. **strukturní a metamorfní vývoj studovaného území**.

S ohledem na výše uvedené parametry je pro samotnou realizaci hlubinného úložiště zpravidla vybírán kompaktní horninový masiv s omezeným tektonickým porušením a **nízkou hydraulickou vodivostí**, která obecně závisí na **permeabilitě horninového prostředí** a přítomnosti nebo **absenci zlomových a puklinových systémů** umožňujících cirkulaci podzemních vod a jiných hydrotermálních roztoků. Právě přítomnost křehkého porušení hornin hraje klíčovou roli při výběru vhodné lokality pro výstavbu hlubinného úložiště, jelikož na většině území v rámci vybraných tuzemských i světových lokalit bude úložiště realizováno pod hladinou podzemní vody. Jako zajímavost uveďme jedinou výjimku – plánované úložiště



v Yucca Mountain na území státu Nevada (USA) se nachází v nesaturované zóně nad hladinou podzemní vody (Swift a Bonano, 2016).

Jako nejvhodnější horninové prostředí pro výstavbu hlubinného úložiště se jeví **krystalinické masivy** (metamorfované nebo granitické komplexy) **bez výrazného tektonického porušení** a **sedimentární jílovité formace** vyznačující se velmi nízkou permeabilitou, zabraňující výrazné cirkulaci podzemních vod. Případnou alternativou bývají také vulkanické komplexy, například výstavba úložiště Yucca Mountain (USA) plánovaná ve vulkanických tufitech, nebo evaporitické formace v podobě solných pňů, zvažovaných pro výstavbu hlubinných úložišť v Carlsbad (Nové Mexiko, USA) a Morsleben (Německo). Naopak cestou výstavby hlubinného úložiště v krystalinickém basementu se vydaly země jako Švédsko, Finsko a případně i Česká republika, zatímco země jako Francie, Švýcarsko a Belgie upřednostňují realizaci hlubinných úložišť v jílovitých litologiích.

V rámci řešeného výzkumného projektu GeoBarr bylo pro multidisciplinární studium využito uranové ložisko Rožná jako možný **přírodní analog vyhořelého jaderného paliva** dlouhodobě uskladněného v horninovém prostředí, a to vzhledem k permskému stáří samotného ložiska (Kříbek et al., 2009), jež odráží zadržení uranu v horninovém masivu po více než 270 milionů let. Jak ukázal samotný výzkum (v kombinaci s již publikovanými daty), geochemický charakter horninového prostředí zcela zásadně kontroluje zadržení, anebo případnou migraci uranu v geologickém podloží. Jak bylo uvedeno výše v kapitole 2.4, klíčovou roli hraje redukční charakter horninového masivu (např. zastoupení na  $\text{Fe}^{2+}$  bohatých silikátů, přítomnost sulfidické fáze a/nebo organického materiálu), který zákonitě modifikuje přítomný uran na jeho redukční formu  $\text{U}^{4+}$ , jež může být za určitých předpokladů v horninovém prostředí stabilní po dobu několika stovek milionů let, jak dokládá přítomnost uranového ložiska Rožná vázaného na metamorfní basement.

Díky aplikaci moderních analytických metod a vyvinuté metodice zobrazení s vysokým rozlišením mohly být v rámci projektu GeoBarr pozorovány **komplexní geologické procesy**, které probíhaly v měřítku pouze několika mikrometrů (viz obrázek 2 a 3), avšak měly za následek buď vznik obrovských ekonomicky významných uranových ložisek, anebo naopak stabilizaci uranu v horninovém masivu po dobu více než 200 milionů let. Výsledky projektu GeoBarr potvrdily, že schopnost, či naopak neschopnost uranu migrovat do okolního horninového prostředí závisí na konkrétních fyzikálně-chemických podmínkách, a to zejména na teplotě, chemickém složení, oxidačně-chemických podmínkách okolních hornin či na charakteru vazby uranu v původních akcesorických minerálech (Kubeš et al., 2021).

## Literatura

- Anenburg, M.; Mavrogenes, J. A.; Frigo, C.; Wall, F. Rare earth element mobility in and around carbonatites controlled by sodium, potassium, and silica. *Science Advances*, roč. 6 (2020), eabb6570.
- Ballouard, C.; Poujol, M.; Boulvais, P.; Mercadier, J.; Tartèse, R.; Venneman, T.; Deloule, E.; Jolivet, M.; Kéré, I.; Cathelineau, M.; Cuney, M. Magmatic and hydrothermal behavior of uranium in syntectonic leucogranites: The uranium mineralization associated with the Hercynian Guérande granite (Armorican Massif, France). *Ore Geology Reviews*, č. 80 (2017), s. 309–331.
- Cathelineau, M.; Boiron, M. C.; Holliger, P.; Poty, B. Metallogensis of the French part of the Variscan orogen. Part II: Time-space relationships between U, Au and Sn-W ore deposition and geodynamic events – mineralogical and U-Pb data. *Tectonophysics*, č. 177 (1990), s. 59–79.
- Chappel, B. W.; White, A. J. R. Two contrasting granite types. *Pacific geology*, roč. 8 (1974), s. 173–174.
- Cuney, M.; Kyser, K. *Recent and Not-So-Recent Developments in Uranium Deposits and Implications for Exploration*. Québec: Mineralogical Association of Canada, 2009, 257 stran.
- Cuney, M. Uranium and thorium: The extreme diversity of the resources of the world's energy minerals. *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*. 2012, s. 91–129.
- Cuney, M. Felsic magmatism and uranium deposits. *Bulletin de la Société géologique de France*, roč. 185 (2014), s. 75–92.
- Cuney, M.; Kyser, K. *Geology and geochemistry of uranium and thorium deposits*. Québec: Mineralogical Association of Canada, 2015, 362 stran.
- Dančák, B.; Černoch, F.; Filipská, P.; Goldbach, M.; Hanzlová, R.; Leichmann, J.; Ocelík, P.; Osička, J.; Švecová, K.; Wertich, V.; Zapletalová, V. *Energy Infrastructure and Exploration Areas. Characteristics, Relationships, and Local Acceptance*. Brno: MuniPress, 2015, 118 stran.

- Honour, V. C.; Goodenough, K. M.; Shaw, R. A.; Gabudianu, I.; Hirtopanu, P. REE mineralisation within the Ditrău Alkaline Complex, Romania: Interplay of magmatic and hydrothermal processes. *Lithos*, č. 314 (2018), s. 360–381.
- International Atomic Energy Agency – IAEA. *Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. ISBN 978-920-1290-106.
- Kříbek, B.; Leichmann, J.; René, M.; Holeczy, D. Přehled geologické stavby strážeckého moldanubika. In: Kříbek, B.; Hájek, A. (eds): *Uranové ložisko Rožná – model pozdně variských a povariských mineralizací*. Česká geologická služba. Praha, 2005.
- Kříbek, B.; Žák, K.; Dobeš, P.; Leichmann, J.; Pudilová, M.; René, M.; Scharm, B.; Scharmová, M.; Hájek, A.; Holéczy, D.; Hein, U. F.; Lehmann, B. The Rožná uranium deposit (Bohemian Massif, Czech Republic): shear zone-hosted, late Variscan and post-Variscan hydrothermal mineralization. *Mineralium Deposita*, č. 44 (2009), s. 99–128.
- Kubeš, M.; Leichmann, J.; Wertich, V.; Mozola, J.; Holá, M.; Kanický, V.; Škoda, R. Metamictization and fluid-driven alteration triggering massive HFSE and REE mobilization from zircon and titanite: Direct evidence from EMPA imaging and LA-ICP-MS analyses. *Chemical Geology*, č. 586 (2021), 120593.
- Lepka, F. *Český uran 1945–2002: Neznámé hospodářské a politické souvislosti*. Liberec: Knihy 555, 2003, 104 stran.
- Marjoribanks, R. W. *Geological methods in mineral exploration and mining*. 2nd ed. New York: Springer, 2010, ISBN 978-3-540-74375-0.
- McGloin, M. V.; Tomkins, A. G.; Webb, G. P.; Spiers, K.; MacRae, C. M.; Paterson, D.; Ryan, C. G. Release of uranium from highly radiogenic zircon through metamictization: The source of orogenic uranium ores. *Geology*, č. 44 (2016), s. 15–18.
- OECD, Organisation for economic co-operation and development a Nuclear Energy Agency NEA. *Uranium 2022: Resources, Production and Demand: Red book* [on-line]. NEA No. 7634. OECD 2023 [cit. 18. 4. 2023]. Dostupné z: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_79960/uranium-2022-resources-production-and-demand](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_79960/uranium-2022-resources-production-and-demand).
- Pluskal, O. Československý uran. *Časopis Uhlí–rudy*, č. 42/8 (1992), s. 259–268.

- Pluskal, O. *Poválečná historie jáchymovského uranu*. Special Papers No. 9. Praha: Česká geologická služba, 1998, 48 stran. Dostupné z: <http://www.geology.cz/spec-papers/obsah/no9>.
- SKB. *Long-term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark. Main Report of the SR-Site Project*. SKB Technical Report TR-11-01, Vol. I.–III. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2011, 892 stran.
- Swift, P. N.; Bonano, E. J. Geological disposal of nuclear waste in tuff: Yucca Mountain (USA). *Elements*, č. 12 (2016), s. 263–268.
- Velichkin, V. I.; Vlasov, B. P. Domal structures and hydrothermal uranium deposits of the Erzgebirge, Saxony, Germany. *Geology of Ore Deposits*, č. 53 (2011), s. 74–83.
- Wertich, V. *Metody a etapy ložiskového průzkumu na uranovou rudu s příklady z uranových ložisek a průzkumných projektů a jejich srovnání s ložiskem Brzkov, MS, GEAM, DIAMO*, s. p., 2016.
- Wertich, V.; Kubeš, M.; Leichmann, J.; Holá, M.; Haifler, J.; Mozola, J.; Hršelová, P.; Jaroš, M. Trace element signatures of uraninite controlled by fluid-rock interactions: A case study from the Eastern Moldanubicum (Bohemian Massif). *Journal of Geochemical Exploration*, č. 234 (2022), 107111.

# URANOVÝ CYKLUS

**OD VZNIKU LOŽISEK URANU AŽ PO HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ  
VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA**

**Martin Kubeš, Vojtěch Wertich**

Obálka: vzorek uranové rudy a doprovodných mineralizací  
Fotograf: František Novotný  
Fotografie: archiv projektu GeoBarr

Grafická úprava a sazba: Mgr. Kateřina Zachovalová, Ph.D.

Jazyková revize: Mgr. Svatava Vráželová

Vydavatel: Masarykova univerzita, Žerotínovo nám. 617/9, 601 77 Brno

Tisk: Expresta, Devínska Nová Ves 7465, 841 07 Bratislava

1. vydání, Brno 2023

ISBN 978-80-280-0321-0

ISBN 978-80-280-0322-7 (on-line ; pdf)

[www.ugv.cz](http://www.ugv.cz)



**MUNI**  
PRESS