

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra anorganické chemie



Koordinační sloučeniny v didaktice chemie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

| | |
|-------------------|--|
| Autor: | Bc. Tereza Kulišková |
| Studijní program: | Učitelství chemie pro střední školy |
| Studijní obor: | Učitelství chemie a biologie pro střední školy |
| Forma studia: | prezenční |
| Vedoucí práce: | Mgr. Peter Antal, Ph.D. |
| Rok: | 2021 |

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Koordináční sloučeniny v didaktice chemie* sepsala samostatně pod odborným vedením Mgr. Petera Antala, Ph.D. V práci jsem uvedla veškeré použité zdroje, jejichž celkový soupis se nachází v seznamu použité literatury.

V Olomouci dne:

Tereza Kulíšková

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych ráda poděkovala Mgr. Peteru Antalovi, Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky, všestrannou pomoc a trpělivost při vypracovávání diplomové práce. Dále chci poděkovat za pomoc a ochotu všem pracovníkům a doktorandům Katedry anorganické chemie.

Také děkuji Ing. Tomáši Povalačovi za konzultace a pomoc s realizací 3D tisku, Ing. Lucii Cmajdálkové a Bc. et Bc. Sáře Matůšové za podporu a připomínky k formální stránce práce.

Poděkování patří také mé rodině, která mě po celou dobu studia byla oporou a poskytovala mi všestrannou pomoc.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

| | |
|----------------|---|
| Jméno autora: | Bc. Tereza Kulíšková |
| Název práce: | Koordinační sloučeniny v didaktice chemie |
| Druh práce: | Diplomová práce |
| Pracoviště: | Katedra anorganické chemie, Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci |
| Vedoucí práce: | Mgr. Peter Antal, Ph.D. |
| Rok obhajoby: | 2021 |

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku koordinačních sloučenin ve výuce chemie. Teoretická část se věnuje charakteristice základních pojmů koordinační chemie, dále shrnuje přehled vybraných teorií popisujících koordinační vazbu a také metody přípravy koordinačních sloučenin. V didaktické části je popsáno postavení tématu koordinačních sloučenin v kurikulárních dokumentech České republiky a zároveň je zde provedena analýza středoškolských učebnic z hlediska problematiky koordinačních sloučenin. Experimentální část se věnuje syntéze vybraných koordinačních sloučenin a přípravě pomůcek využitelných ve výuce.

Klíčová slova: koordinační sloučenina, komplex, chrom, kobalt, didaktické pomůcky, didaktika chemie

Počet stran: 75

Jazyk: čeština

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author's name: Bc. Tereza Kulíšková
Title: Coordination compounds in didactics of Chemistry
Type of thesis: Diploma thesis
Department: Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Science,
Palacký University in Olomouc
Supervisor: Mgr. Peter Antal, Ph.D.
The year of presentation: 2021

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the issue of coordination compounds in the teaching of Chemistry. The theoretical part deals with the characteristics of the basic concepts of coordination chemistry, summarizes selected theories describing coordination bonding and methods of preparation of coordination compounds. The didactic part describes the position of the subject of coordination compounds in the curricular documents of the Czech Republic and there is also an analysis of high school textbooks focused on the issue of coordination compounds. The experimental part describes the preparation of selected coordination compounds of chromium and cobalt and making of teaching aids.

Keywords: coordination compound, complex, chromium, cobalt, didactic tools, didactic of chemistry
Number of pages: 75
Language: Czech

OBSAH

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | TEORETICKÁ ČÁST | 9 |
| 1.1 | Základní pojmy koordinační chemie | 9 |
| 1.1.1 | Centrální atom | 10 |
| 1.1.2 | Ligand | 10 |
| 1.2 | Stereochemie koordinačních sloučenin | 13 |
| 1.2.1 | Koordinační číslo 2 a 3 | 14 |
| 1.2.2 | Koordinační číslo 4 | 15 |
| 1.2.3 | Koordinační číslo 5 | 16 |
| 1.2.4 | Koordinační číslo 6 | 16 |
| 1.2.5 | Koordinační čísla 7, 8 a 9 | 17 |
| 1.2.6 | Koordinační čísla větší než 9 | 19 |
| 1.3 | Teorie popisující koordinační sloučeniny | 23 |
| 1.3.1 | Teorie valenčních vazeb | 23 |
| 1.3.2 | Teorie krystalového pole | 26 |
| 1.3.3 | Teorie molekulových orbitalů a teorie ligandového pole | 30 |
| 1.4 | Vybrané způsoby přípravy koordinačních sloučenin | 33 |
| 1.4.1 | Přípravy koordinačních sloučenin založené na substitučních reakcích | 33 |
| 1.4.2 | Přípravy koordinačních sloučenin založené na oxidaci a redukcí | 34 |
| 1.4.3 | Ostatní způsoby přípravy | 35 |
| 2 | DIDAKTICKÁ ČÁST | 36 |
| 2.1 | Kurikulární dokumenty České republiky | 36 |
| 2.2 | Koordinační sloučeniny v RVP | 36 |
| 2.3 | Koordinační sloučeniny v ŠVP | 37 |
| 2.3.1 | Koordinační sloučeniny v ŠVP Masarykova gymnázia, Střední zdravotnické školy a Vyšší odborné školy zdravotnické Vsetín | 38 |
| 2.3.2 | Koordinační sloučeniny v ŠVP Slovanského gymnázia Olomouc | 39 |
| 2.3.3 | Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Olomouc – Hejčín | 40 |
| 2.3.4 | Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Slovanské náměstí Brno | 40 |
| 2.3.5 | Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Elišky Krásnohorské Praha | 41 |
| 2.4 | Analýza učiva koordinačních sloučenin ve středoškolských učebnicích | 42 |
| 2.4.1 | Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl | 44 |
| 2.4.2 | Přehled středoškolské chemie | 45 |
| 2.4.3 | Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická | 46 |
| 2.4.4 | Odmaturuj! z chemie | 47 |
| 2.4.5 | Chemie v kostce pro střední školy | 48 |
| 2.4.6 | Kompendum chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník | 49 |
| 2.4.7 | Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I. | 50 |
| 3 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 51 |
| 3.1 | Seznam chemikálií | 51 |
| 3.2 | Příprava koordinačních sloučenin | 52 |
| 3.2.1 | Trihydrát chloridu hexaureachromitého $[\text{Cr}(\text{ur})_6]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 52 |
| 3.2.2 | Tris(acetylacetato)chromitý komplex $[\text{Cr}(\text{acac})_3]$ | 52 |
| 3.2.3 | Tetrahydrát hexaisothiokyanatochromitanu draselného $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{NCS})_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 53 |
| 3.2.4 | Hexakyanidochromitan draselný $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{CN})_6]$ | 53 |
| 3.2.5 | Trihydrát tris(oxalato)chromitanu draselného $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{ox})_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 54 |
| 3.2.6 | Chlorid hexaaminkobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ | 54 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.2.7 | Trihydrát tris(karbonato)kobaltitanu sodného $\text{Na}_3[\text{Co}(\text{CO}_3)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 55 |
| 3.2.8 | Hexanitrokobaltitan sodný $\text{Na}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]$ | 55 |
| 3.2.9 | Tris(acetylacetato)kobaltitý komplex $[\text{Co}(\text{acac})_3]$ | 56 |
| 3.2.10 | Chlorid tris(ethylendiammin)kobaltitý $[\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 56 |
| 3.2.11 | Tris(glycinato)kobaltitý komplex $[\text{Co}(\text{gly})_3]$ | 57 |
| 3.2.12 | Chlorid pentaaminchloridokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ | 57 |
| 3.2.13 | Chlorid pentaamminaquakobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_3$ | 58 |
| 3.2.14 | Chlorid pentaamminnitritokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{ONO})]\text{Cl}_2$ | 58 |
| 3.2.15 | Chlorid pentaamminnitrokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}_2$ | 59 |
| 3.3 | Použité metody a přístroje | 59 |
| 3.4 | Didaktická pomůcka | 61 |
| 3.4.1 | Série komplexních sloučenin | 62 |
| 3.4.2 | Karty s UV/VIS spektry | 63 |
| 3.4.3 | Karetní hra – kvarteto | 64 |
| 4 | VÝSLEDKY A DISKUZE | 65 |
| 5 | ZÁVĚR | 69 |
| 6 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 71 |
| 7 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 72 |

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Neoddělitelnou součástí chemie přechodných kovů tvoří koordinační sloučeniny, které jsou z historického hlediska lidem známé již od starověku. Pravděpodobně první sloučeninou tohoto typu bylo červené barvivo alizarin, které se získávalo vyluhováním kořene mořeny barvířské (*Rubia tinctorum*) a s ionty vápníku a hliníku, jejichž zdrojem byl jíl, vytvořily látku s vlastnostmi vhodnými pro barvení textilních tkanin. Jako se postupně utvářelo a zdokonalovalo lidské poznání světa kolem nás, tak se postupně rozvíjely poznatky o koordinačních sloučeninách. Chemickou podstatu komplexů objasnil před více než sto lety švýcarský chemik Alfred Werner, kterého považujeme za zakladatele koordinační chemie.^{1,2,3}

Při výuce chemie na střední škole je téma koordinačních sloučenin probíráno spíše okrajově nebo jako součást jiných kapitol učiva, např. učiva o chemických vazbách, d-prvcích nebo v rámci chemického názvosloví. V Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia (RVP G), v němž chemie spadá do vzdělávací oblasti Člověk a příroda, je tato problematika zahrnuta do vzdělávacího obsahu anorganické chemie jako učivo „d- a f-prvky a jejich sloučeniny“. Školy ve svých školních vzdělávacích programech (ŠVP) téma zapracovávají odlišně, což se odráží na výsledném obsahu látky probírané ve vyučování. Zároveň se různí také zpracování tohoto tématu ve středoškolských učebnicích. Zhodnocení rozsahu a úrovně obsahu tématu koordinačních sloučenin v používaných středoškolských učebnicích rozebírá samostatná didaktická část.

Cílem teoretické části diplomové práce bylo vytvořit přehled základů vybraných teorií popisujících koordinační sloučeniny. Jednotlivé teorie se vzájemně liší v přesnosti, resp. celkovém zjednodušení výkladu koordinačně-kovalentní vazby v koordinačních sloučeninách. Zároveň si teoretická část klade za cíl zpracovat přehled možných způsobů přípravy koordinačních sloučenin. Úkolem praktické části diplomové práce bylo vytvoření výukových pomůcek, které by dopomohly demonstrovat vybrané vlastnosti koordinačních sloučenin a zároveň zatraktivněly probírané téma. S tím souvisí i další cíl spočívající v přípravě vybraných komplexních sloučenin chromu a kobaltu, jenž jsou v didaktických pomůčkách využity.

1 TEORETICKÁ ČÁST

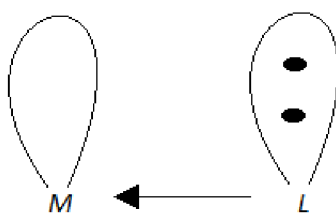
1.1 Základní pojmy koordinační chemie

Koordinační sloučenina nebo také komplexní sloučenina či komplex jsou slovní spojení označující totožný typ chemické sloučeniny. Koordinační sloučenina obsahuje tzv. koordinační entitu. Jedná se o molekuly nebo ionty obsahující ve své struktuře centrální atom, na který se prostřednictvím chemické vazby váže jeden nebo více ligandů. Schopnost atom vázat na sebe jiné atomy či ionty se obecně označuje termínem koordinace. Vzorec koordinační sloučeniny rozpoznáme dle toho, že jej zapisujeme do hranatých závorek.^{4,5}



(M = označení centrální atomu, L = označení ligandu, Y = počet ligandů L).

Mezi centrálním atomem a ligandem dochází ke vzájemnému silovému působení, které známe jako chemickou vazbu, a v koordinačních sloučeninách jej nazýváme vazbou koordinačně-kovalentní, donor-akceptorovou nebo dativní (Obr. 1). Zatímco pro kovalentní vazbu je charakteristické sdílení elektronového páru, v němž každý elektron pochází od jednoho z vazebných partnerů, koordinačně-kovalentní vazba vzniká v důsledku sdílení volného elektronového páru jednoho atomu (donoru) s prázdným elektronovým orbitalem atomu druhého (akceptoru). Kovalentní a koordinačně-kovalentní vazba se tak liší svým vznikem, ale jejich vlastnosti jsou shodné.^{6,7}



Obr. 1: Schematické znázornění sdílení elektronového páru mezi donorem a akceptorem

(M = akceptor, L = donor).

Ve sloučeninách mohou mít komplexní částice charakter komplexního kationtu (např. $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$), komplexního aniontu (např. $[\text{VO}(\text{O}_2)_2(\text{NH}_3)]^-$, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$, $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$), komplexního kationtu i aniontu

současně (např. $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6][\text{Cr}(\text{CN})_6]$, $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4][\text{CuCl}_4]$, $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4][\text{PtCl}_4]$) nebo tvoří elektroneutrální molekuly (např. $[\text{Co}(\text{NH}_3)_3\text{Cl}_3]$, $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$, $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$).⁴

1.1.1 Centrální atom

Centrální atom (dále CA) je označení částice, která obsahuje volné (vakantní) elektronového orbitaly. V důsledku přítomnosti volných orbitalů má CA charakter Lewisovy kyseliny, kdy mohou být do nezaplněných orbitalů přijímány volné elektronové páry. Centrální atom se tak stává akceptorem (příjemcem) volných elektronů, čímž se podílí na vzniku koordinačně-kovalentní vazby.^{6,7}

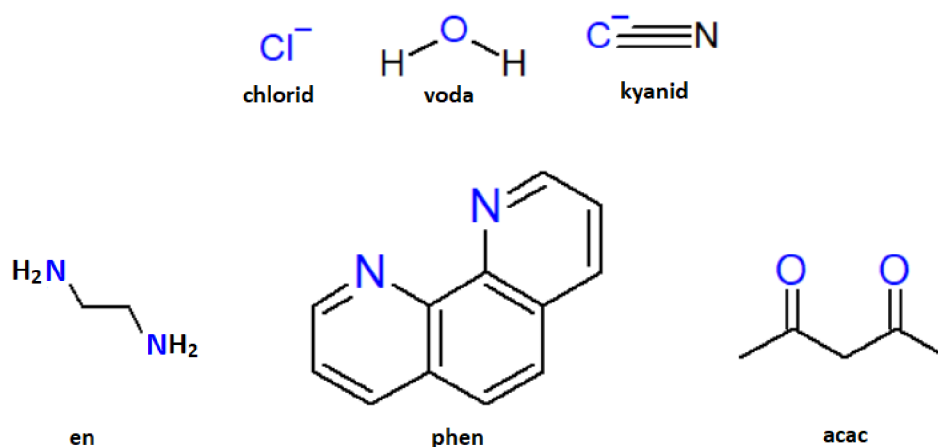
Nejběžnějšími prvky, které v koordinačních sloučeninách tvoří CA, jsou atomy či ionty přechodných kovů (d-prvky) v kladném oxidačním stavu (např. Pt^{IV} , Cr^{III} , Co^{II} , Fe^{II} , Cu^{II} , atd.). Možnost tvorby komplexních sloučenin vychází z přítomnosti neobsazených nebo částečně neobsazených d-orbitalů, jež mohou být využity právě k tvorbě koordinačně-kovalentní vazby. Nezvyklý případ nastává u CA, u něhož jsou d_π orbitaly zaplněny nevazebnými elektronovými páry – ve vztahu k ligandům s vakantními orbitaly má charakter π -donoru. Dle počtu CA v molekule komplexu rozlišujeme jednojaderné, dvoujaderné a vícejaderné komplexy. Propojení centrálních atomů u komplexů s více než jedním CA zprostředkovává můstkový ligand nebo přímé spojení, tj. vazba kov-kov.^{5,6,8}

1.1.2 Ligand

Částicí, která disponuje volnými elektronovými páry, je tzv. ligand, který může být tvořen atomem, iontem či molekulou. V koordinační sloučenině má ligand charakter Lewisovy báze, jelikož své volné elektronové páry poskytuje volným orbitalům CA za tvorby koordinačně-kovalentní vazby. Díky schopnosti poskytovat elektrony je atom ligandu označován jako donor (dárce), atom ligandu vázaný přímo na CA pak jako donorový atom.^{5,6,8}

Ligandy je možné klasifikovat podle různých kritérií. Klasifikace založená na počtu donorových atomů ligandu rozděluje ligandy na jednovazné (monodentátní), dvojevazné (bidentátní) a ligandy s vícero donorovými atomy, tzv. vícevazné (polydentátní). Nejjednoduššími jsou jednovazné (monodentátní) ligandy s jedním donorovým atomem, mezi které řadíme např. Cl^- , H_2O nebo CN^- . Dvojevazné neboli bidentátní ligandy obsahují dva donorové atomy, z nichž oba se mohou vázat ke shodnému CA nebo každý k jinému

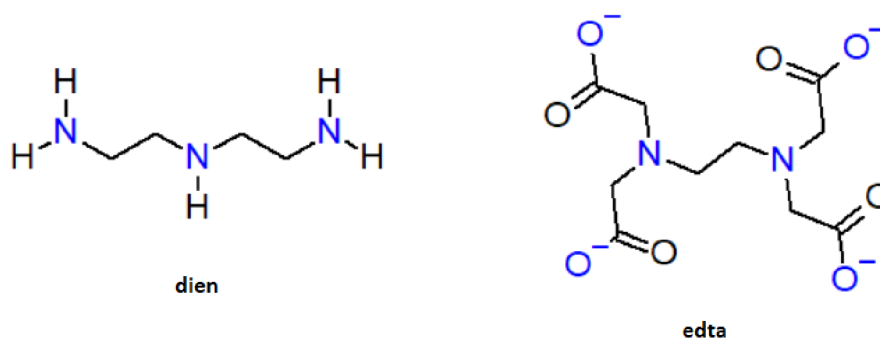
(u vícejaderných komplexů). Příkladem ligandů z této skupiny je ethylendiamin (en), 1,10-fenantrolin (phen) a acetylacetonát (acac⁻) (Obr. 2).⁸



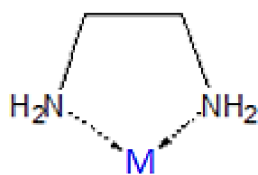
Obr. 2: Strukturální vzorce vybraných jednovazných a dvojevazných ligandů, přičemž donorové atomy jsou zvýrazněny modře (en: ethylendiamin, phen: 1,10-fenantrolin, acac: acetylacetonát).

Více vazné (polydentátní) ligandy obsahují tři a více donorových atomů. Mezi známější zástupce z této skupiny patří např. diethylentriamin (dien) s třemi donorovými atomy nebo ethylendiamintetraoctová kyselina (edta) s šesti donorovými atomy (Obr. 3). Koordinací bidentátního nebo polydentátního ligandu na CA vzniká ve struktuře koordinační sloučeniny uzavřený kruh, tzv. chelátový kruh, a příslušné ligandy nazýváme jako chelatační. Vzniklé chelátové kruhy mohou být čtyř-, pěti-, šesti- nebo vícečlenné (Obr. 4).

9

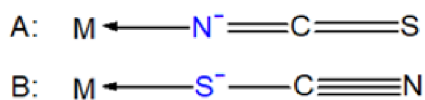


Obr. 3: Strukturální vzorce vybraných vícevazných ligandů, přičemž donorové atomy jsou zvýrazněny modře (dien: diethylentriamin, edta: kyselina ethylendiamintetraoctová).



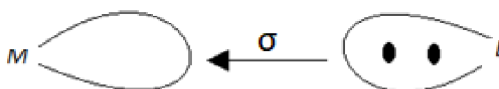
Obr. 4: Schematické znázornění vazby bidentátního ligandu na centrální atom za vzniku chelátového kruhu (M = centrální atom).

Výjimku v této klasifikaci tvoří ligandy ambidentátní, jenž ve své struktuře obsahují více donorových atomů, ale na vazbě s CA se podílí pouze jeden z nich. Příkladem ambidentátního ligandu je thiokyanatanový (SCN^-) a isothiokyanatanový (NCS^-) ion, kdy se první zmíněný koordinuje skrze atom síry, druhý skrze atom dusíku (Obr. 5).¹⁰



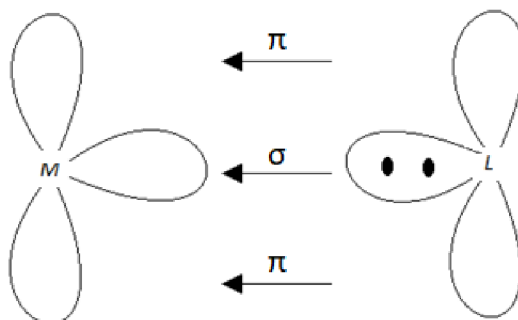
Obr. 5: Znázornění rozdílných možností koordinace u ligandu SCN^- , donorový atom je znázorněn modře (A: thiokyanatanový aniont koordinující se skrze atom síry, B: isothiokyanatanový aniont koordinující se skrze atom dusíku).

Další klasifikace ligandů vychází ze způsobu vazby mezi ligandem a CA. První skupinou ligandů jsou σ -donory poskytující volný elektronový pár CA a vytvořená koordinační vazba má symetrii σ (Obr. 6). Mezi CA a ligandem se v tomto případě neobjevuje žádná další vazebná interakce. Příkladem ligandů z této skupiny jsou např. aminy R_3N , R_2NH , RNH_2 nebo H_2O .⁹



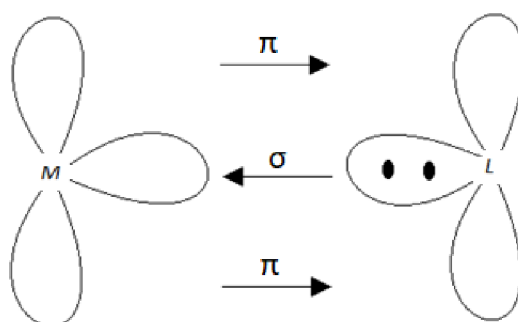
Obr. 6: Schematické znázornění donace σ -donoru (M = centrální atom, L = ligand).

U skupiny σ a π -donorových ligandů je vazba symetrie σ doplněna vazbou symetrie π (Obr. 7). V tomto případě obsahuje ligand více nevazebných elektronových párů, které se mohou podílet na tvorbě vazeb s CA. Pro vznik vazby symetrie π je potřeba, aby se nevazebný elektronový pár nacházel ve vhodně orientovaném orbitalu vzhledem k CA. K této skupině patří především záporně nabitě anionty jako např. Cl^- , Br^- , I^- , NH_2^- nebo N^{3-} .^{9,11}



Obr. 7: Schematické znázornění donace σ a π -donoru (M = centrální atom, L = ligand).

Třetí skupina dané klasifikace zahrnuje ligandy s volným elektronovým párem a volnými orbitaly. Zatímco volný elektronový pár ligandu se stejně jako u předchozích skupin podílí na tvorbě vazby symetrie σ , volné orbitaly přijímají nevázané elektronové páry přítomné na CA, a tím se podílí na vzniku vazby symetrie π . Ligandy spadající do této skupiny proto označujeme jako σ -donory a π -akceptory, řadíme zde např. CO, CN⁻, PH₃ nebo ethen (Obr. 8).^{8,11}



Obr. 8: Schematické znázornění vazby u ligandů ze skupiny σ -donorů a π -akceptorů (M = centrální atom, L = ligand).

1.2 Stereochemie koordinačních sloučenin

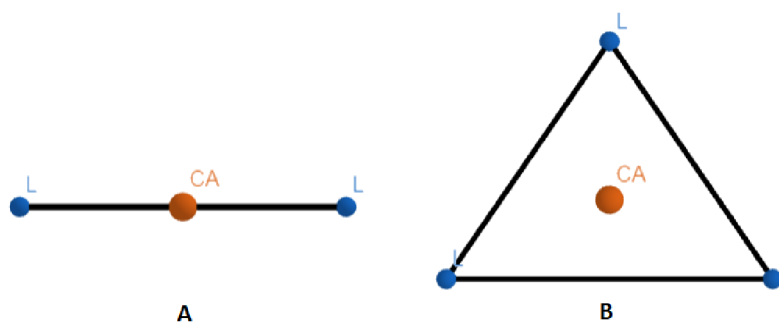
Stereochemie neboli prostorové uspořádání je u koordinačních sloučenin ovlivněno konkrétním rozmístěním ligandů, resp. donorových atomů v okolí CA. Povětšinou je toto rozmístění symetrické a výsledný tvar koordinační sloučeniny pravidelný. Prostor vymezený donorovými atomy kolem CA se nazývá koordinační polyedr (mnohostěn) nebo polygon (mnohoúhelník). Souhrnné označení pro soubor ligandů vázaných na CA je tzv. koordinační sféra.^{6,9}

S tvarem koordinačních sloučenin souvisí pojem koordinační číslo, které vyjadřuje počet atomů vázaných na CA jednou vazbou, tj. jednovazných ligandů. Jeho hodnota převyšuje hodnotu oxidačního čísla CA a nejčastěji se nachází v rozmezí 2 až 9.

Jednotlivým koordinačním číslům odpovídají konkrétní koordinační polyedry. Mezi koordinačními sloučeninami přechodných kovů je nejběžnější hodnota 4 a 6.^{6,9,11}

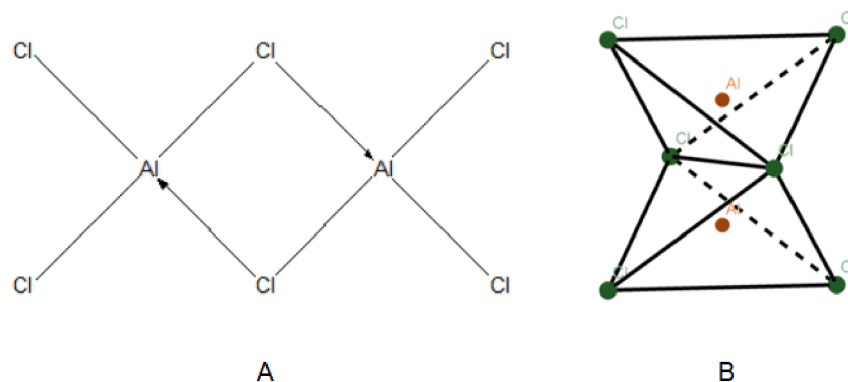
1.2.1 Koordinační číslo 2 a 3

Jedná se o koordinační čísla, která jsou mezi komplexními sloučeninami poměrně vzácná. Sloučeniny, ve kterých má CA koordinační číslo 2, vykazují lineární uspořádání (Obr. 9) a byly pozorovány u komplexů Cu^{I} , Ag^{I} , Au^{I} nebo Hg^{II} . Příkladem sloučenin s koordinačním číslem 2 jsou $[\text{CuCl}_2]^-$, $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$, $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ nebo $[\text{Hg}(\text{CN})_2]^-$. Tvar koordinačního polyedru pro komplex s koordinačním číslem 3 odpovídá rovnostrannému trojúhelníku (Obr. 9), ve kterém se CA nachází v těžišti trojúhelníka. Příkladem komplexní částice s tímto uspořádáním je aniont $[\text{HgI}_3]^-$ nebo $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{2-}$.^{5,12}



Obr. 9: Schematické znázornění ideálního prostorového uspořádání koordinační sféry typické pro koordinační čísla 2 (A = přímka) a 3 (B = rovnostranný trojúhelník).

Existují však látky, u kterých pouhé stanovení počtu ligandů nepostačuje jako informace k určení jejich struktury a skutečného koordinačního čísla. Příkladem je chlorid hlinitý AlCl_3 , jehož formální koordinační číslo rovno 3. S pomocí metod elektronové difrakce a rentgenové strukturní analýzy bylo zjištěno, že struktura chloridu hlinitého je polymerní a atom hliníku dosahuje vyššího koordinačního čísla. Strukturní jednotkou chloridu hlinitého je dimer Al_2Cl_6 (Obr. 10 A). Vyřešení krystalové struktury ukázalo, že molekula je tvořena dvěma čtyřstěny propojenými společnou hranou, v nichž je jeden atom hliníku obklopen celkově čtyřmi atomy chloru. Z celkových šesti atomů chloru jsou však dva spojeny s oběma atomy hliníku (Obr. 10 B).^{5,8,13}

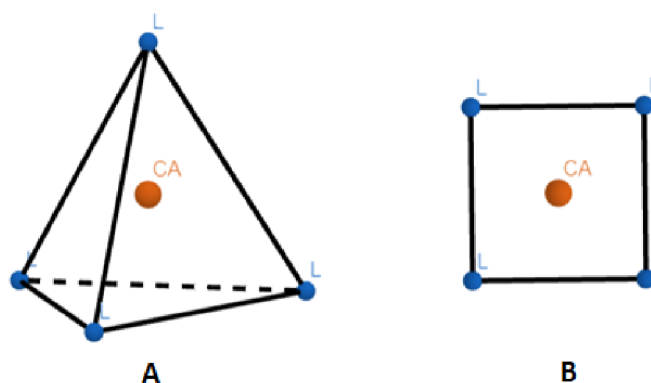


Obr. 10: Znázornění strukturního vzorce (A) a prostorového uspořádání dimeru Al_2Cl_6 (B) v krystalové struktuře AlCl_3 ¹³.

1.2.2 Koordinační číslo 4

Jestliže se v koordinační sféře CA nachází čtyři ligandy, lze je v prostoru uspořádat dvěma způsoby – do tvaru tetraedru nebo planárního čtverce (Obr. 11). Výsledný typ prostorového uspořádání však závisí na elektronové konfiguraci CA.⁵

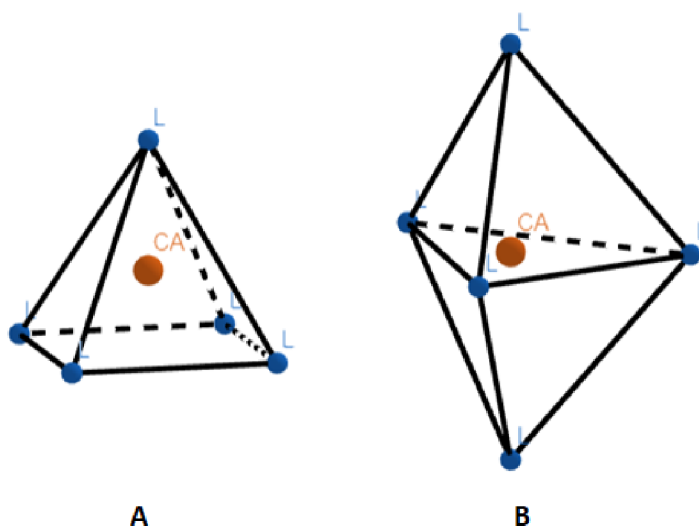
Tetraedrický tvar preferují atomy s elektronovou konfigurací d^5 nebo d^{10} , popř. CA nepřechodných kovů, které nemají k dispozici d-orbital (např. Be^{II} , B^{III} , Co^{II} , Cu^{II} , Zn^{II} , Cd^{II}). Jedná se o stabilní symetrické rozložení ligandů v okolí CA, v němž je vzájemná vzdálenost mezi nimi co nejdelší. Komplexními sloučeninami s tetraedrickým uspořádáním jsou např. $[\text{Ni}(\text{CO})_4]$, $[\text{BF}_4]^-$ nebo $[\text{Cu}(\text{py})_4]^+$. Čtvercové uspořádání je méně obvyklé a vyskytuje se u komplexů s elektronovou konfigurací d^8 u CA, kterými jsou např. Rh^{I} , Ir^{I} , Pt^{II} , Pd^{II} a Au^{III} .^{9,12}



Obr. 11: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačních polyedrů (A = tetraedr, B = čtverec) typických pro koordinační číslo 4.

1.2.3 Koordinační číslo 5

Pro koordinační číslo 5 existují dva způsoby prostorového uspořádání. Prvním z nich je trigonální bipyramida (Obr. 12), jejíž tvar zaujímá např. $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$ nebo $[\text{HgCl}_5]^{3-}$. Rozmístění do podoby tetragonální (čtvercové) pyramidy (Obr. 12) zaujímají ligandy např. u sloučeniny $[\text{MnCl}_5]^{2-}$. Pravidelná geometrie je spíše výjimkou, daleko častěji dochází k deformaci v důsledku změny velikosti úhlu ve struktuře komplexu. Mezi faktory ovlivňující konečnou podobu prostorového uspořádání koordinační sloučeniny řadíme elektrostatickou repulzi mezi ligandy, povahu vazeb kov-ligand, tvar molekul ligandu a další. Jelikož jsou hodnoty energií pro vzájemné přeměny obou struktur nízké, mohou mezi nimi sloučeniny přecházet. Obě strukturální formy pozorujeme u komplexu $[\text{Ni}(\text{CN})_5]^{3-}$.^{5,8,9,14}



Obr. 12: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačních polyedrů (A= tetragonální pyramida, B = trigonální bipyramida) typických pro koordinační číslo 5.

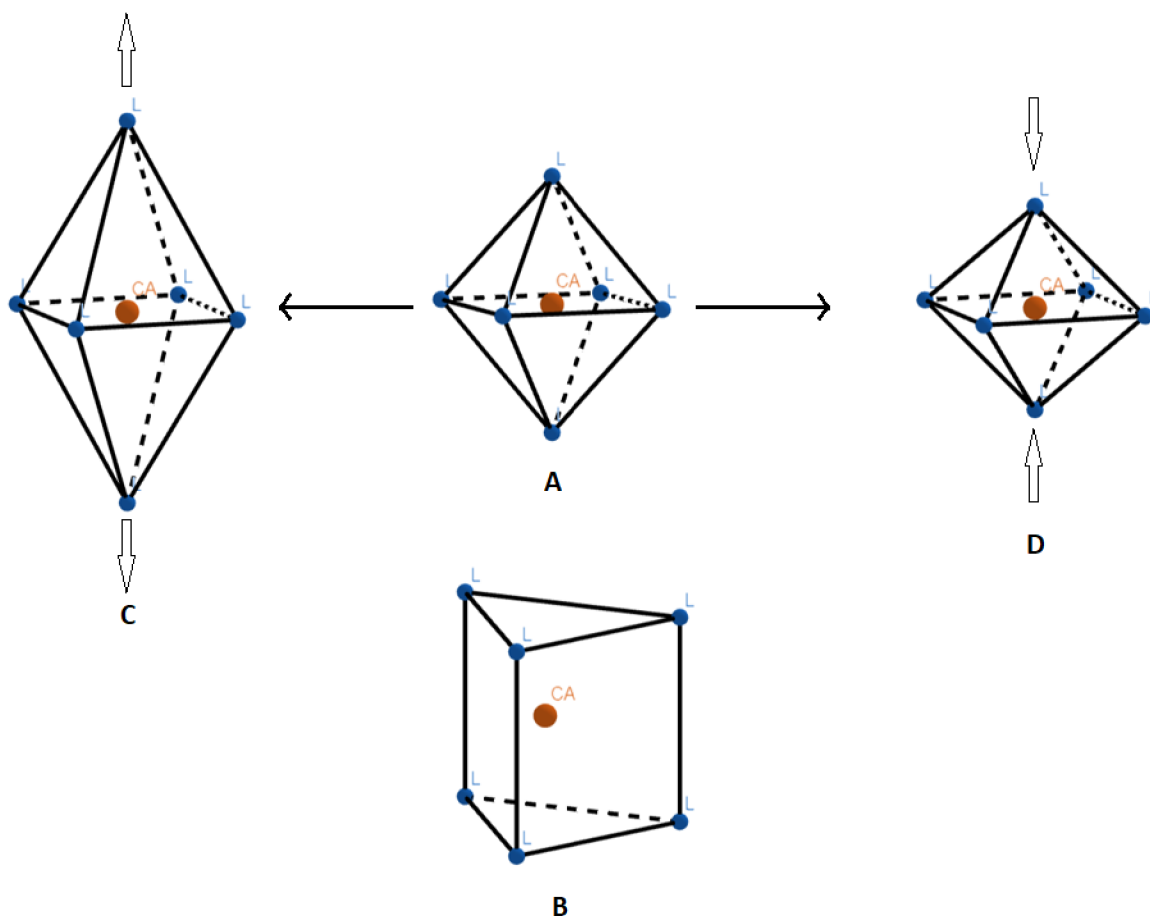
1.2.4 Koordinační číslo 6

U většiny koordinačních sloučenin přechodných prvků odpovídá koordinační číslo hodnotě 6, tzn. šest donorových atomů vázaných na atom centrálního kovu. Jejich uspořádání odpovídá nejčastěji tvaru oktaedru (tetragonální neboli čtvercové bipyramidy) (Obr. 13), v němž jsou ligandy uspořádány pravidelně a s co nejdelší vzájemnou vzdáleností.^{5,8,12}

Oktaedrické uspořádání podléhá deformacím, které vedou ke změně výsledného tvaru molekuly komplexu. K deformaci dochází v případě oddálení, resp. přiblížení ligandů umístěných v protilehlých vrcholech oktaedru ve směru osy z, stlačením či protažením dvou

protilehlých stěn oktaedru nebo jejich vzájemnou rotací. V důsledku deformací vznikl druhý tvar charakteristický pro koordinační číslo 6, kterým nazýváme trigonální prizma neboli trojboký hranol (Obr. 13). K jisté odchylce od pravidelného tvaru dochází i tehdy, jestliže se na CA vážou odlišné typy ligandů, tj. koordinační sféra je heterogenní.^{5,8,9,12}

Strukturu oktaedru vytváří např. sloučeniny $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ nebo $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, deformovaný tvar oktaedru zaujímá tetragonální bipyramida $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. Strukturu trigonálního prizma přisuzujeme částici MoS_6 , který vytváří jednotku ve vrstevnaté struktuře MoS_2 .¹¹

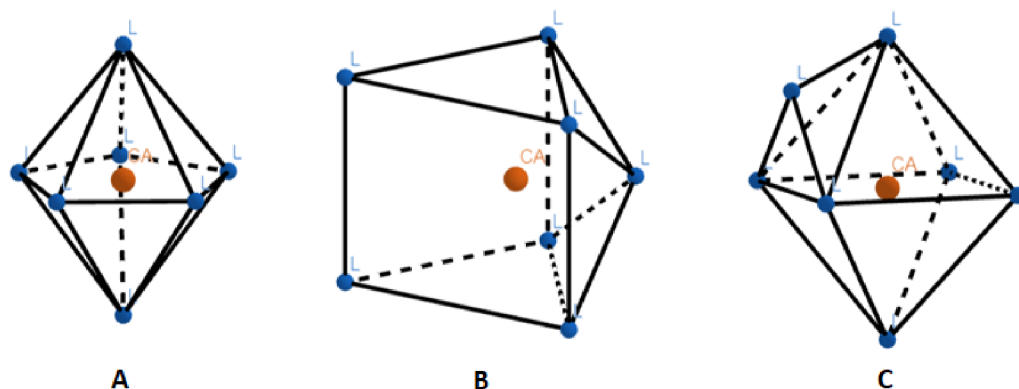


Obr. 13: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačních polyedrů typických pro koordinační číslo 6 (A = pravidelný oktaedr; B = trigonální prizma). Znázornění deformace pravidelného oktaedru (A) v axiálním směru (C - prodloužení, D - zkrácení).

1.2.5 Koordinační čísla 7, 8 a 9

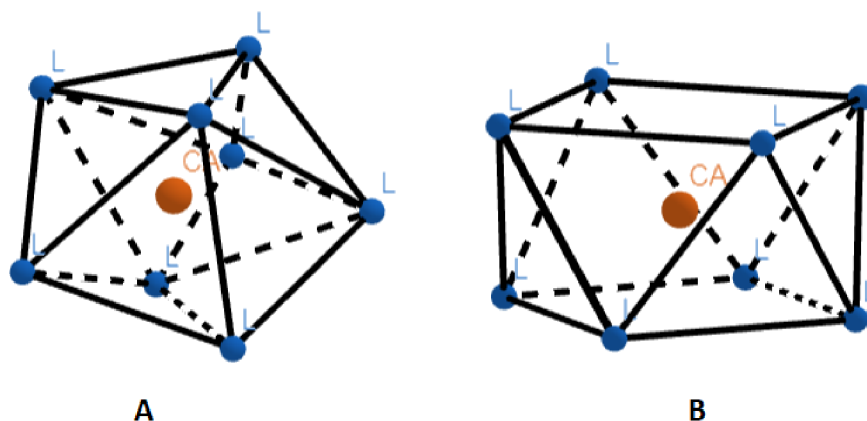
Sedm donorových atomů v koordinační sféře komplexní sloučeniny lze uspořádat třemi způsoby, z nichž nejsouměrnějším tvarem je pentagonální bipyramida (Obr. 14). Další prostorová uspořádání odvozujeme od tvarů charakteristických pro koordinační číslo

6, kdy nad stěnu oktaedru či trigonálního prizmatu umístíme sedmý vrchol. Z energetického hlediska se tyto struktury liší minimálně, a proto dochází ke vzniku deformací jejich tvaru, které mohou být způsobeny např. vychýlením ligandu mimo rovinu os x a y . Posunem ligandu směrem k jednomu ze dvou vrcholových ligandů vzniká nepravidelný osmistěn, pokračováním posunu ve stejném směru dojde k vytvoření trigonálního prizma s jedním přidaným vrcholem (Obr. 14). Příkladem komplexní sloučeniny s koordinačním číslem 7 a tvarem pentagonální bipyramidy je $[\text{ZrF}_7]^{3-}$ a $[\text{Mo}(\text{CN})_7]^{5-}$, tvar trigonálního prizma s jedním přidaným vrcholem má např. $[\text{NbF}_7]^{2-}$ a komplex s uspořádáním oktaedru s jedním přidaným vrcholem nad stěnou oktaedru je $[\text{NbF}_6\text{O}]$.^{5,9,11,12,15}



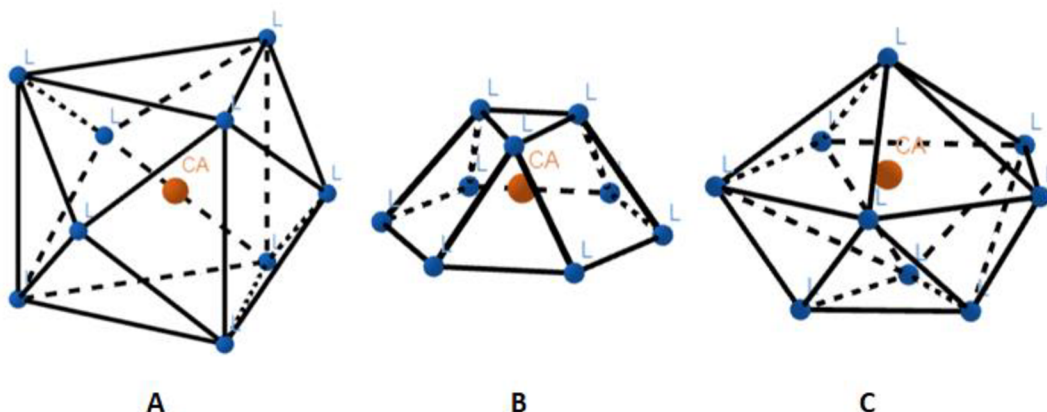
Obr. 14: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačních polyedrů typických pro koordinační číslo 7 (A = pentagonální bipyramida, B = trigonální prizma s jedním přidaným vrcholem, C = oktaedr s jedním přidaným vrcholem).

Prostorové uspořádání tvaru krychle zaujmají sloučeniny s koordinačním číslem 8, které se mezi komplexními sloučeninami objevují zcela výjimečně. Vzhledem k odpuzování ligandů je krychle deformována na strukturu dodekaedru (dvanáctistěnu) či tetragonálního antiprizmatu (Obr. 15). Příkladem sloučeniny s krychlovým uspořádáním je komplex $[\text{UF}_8]^{3-}$ nebo $[\text{U}(\text{NCS})_8]^{4-}$, struktura $[\text{ZrF}_8]^{4-}$ je dodekaedrická a příkladem komplexu s tvarem tetragonálního antiprizmatu považujeme $[\text{TaF}_8]^{3-}$ či $[\text{ReF}_8]^{2-}$.^{5,9,11}



Obr. 15: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačních polyedrů typických pro koordinační číslo 8 (A = dodekaedr, B = tetragonální antiprisma).

Typickým tvarem koordinačního polyedru s koordinačním číslem 9 je trigonální prizma s třemi přidávanými vrcholy nad svislými stěnami prizmatu (Obr. 16). Jedná se o jediné pravidelné uspořádání, jenž bylo u tohoto koordinačního čísla popsáno. Uspořádání zaujímá např. $[\text{La}(\text{H}_2\text{O})_9]^{3+}$ nebo iont $[\text{ReH}_9]^{2-}$. Přítomnost devíti ligandů, resp. donorových atomů umožňuje vznik i složitějších mnohostěnů, jako je trojúhelníková kopule či struktura označovaná jako muffin.^{9,11,16}

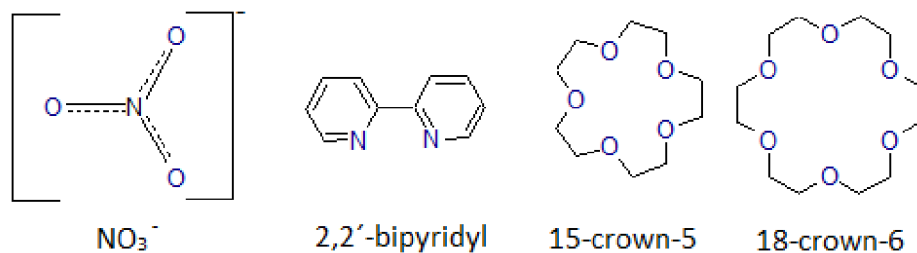


Obr. 16: Schematické znázornění ideální geometrie koordinačního polyedru typického pro koordinační číslo 9. (A = trigonální prizma s třemi přidávanými vrcholy, B = trojúhelníková kopule, C = muffin).

1.2.6 Koordinační čísla větší než 9

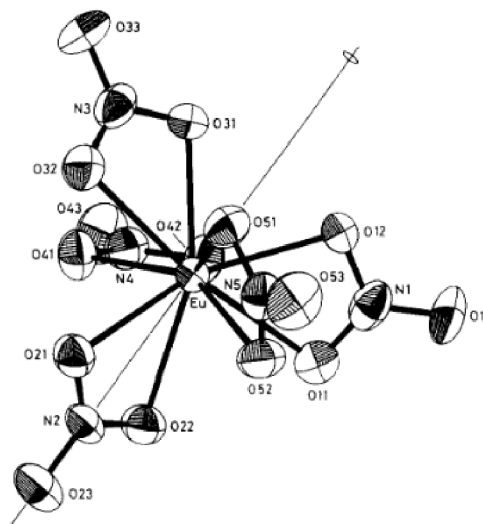
S rostoucím počtem donorových atomů roste i počet možností, jak se mohou ligandy v okolí CA uspořádat. Předpokladem vyšších koordinačních čísel je dostupnost f-orbitalu, a proto větších koordinačních čísel dosahují právě f-prvky (lanthanoidy a aktinoidy včetně lanthanu a aktinia). Vzhledem k významnému odpuzování mezi monodentátními ligandy

se u vyšších koordinačních čísel setkáváme s ligandy s větším počtem donorových atomů, tj. s bidentátními či polydentátními ligandy. Příkladem bidentátního ligandu tvořícího koordinačně-kovalentní vazbu s lanthanoidy je dusičnanový aniont (NO_3^-) či 2,2'-bipyridyl, jako polydentátní ligandy vystupují crownethery, např. 15-crown-5 nebo 18-crown-6 (Obr. 17).^{6,17}

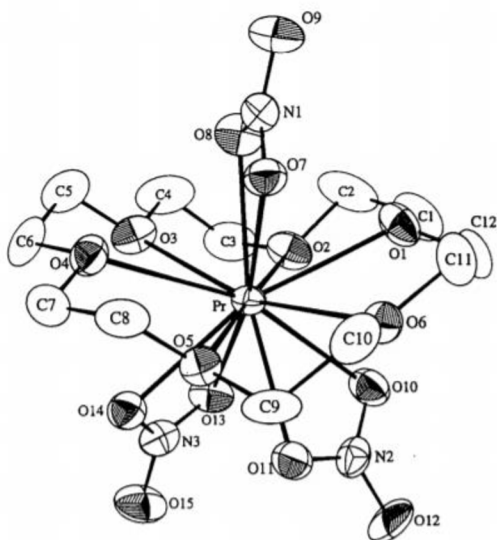


Obr. 17: Strukturální vzorce vybraných bidentátních a polydentátních ligandů (modrá barva značí donorové atomy).

Poměrně prozkoumanými jsou polyedry lanthanoidů, u nichž koordinační číslo dosahuje hodnot 10 a 12. Tvary nemusí být nutně nepravidelné, dokonce se v případě identických ligandů blíží symetrickým útvarům. Komplexem s koordinačním číslem 10 je např. $[\text{Eu}(\text{NO}_3)_5]^{2-}$ (Obr. 18), koordinačního čísla 12 dosahuje např. komplex $[\text{Pr}(\text{18-crown-6})(\text{NO}_3)_3]$ (Obr. 19).¹⁷

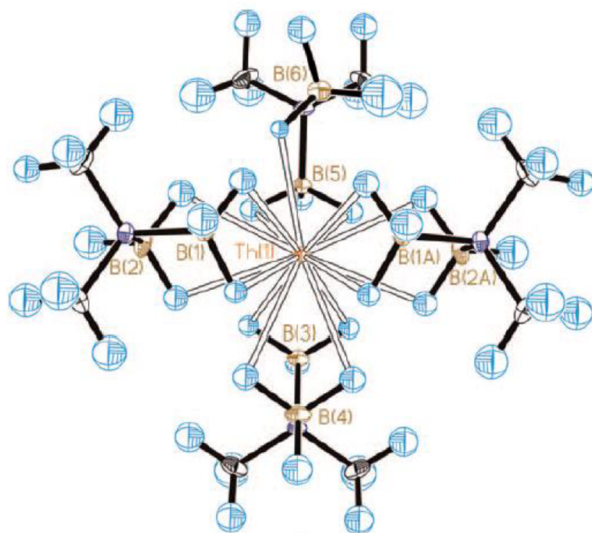


Obr. 18: Molekulová struktura $[\text{Eu}(\text{NO}_3)_5]^{2-}$ s koordinačním číslem 10.¹⁸

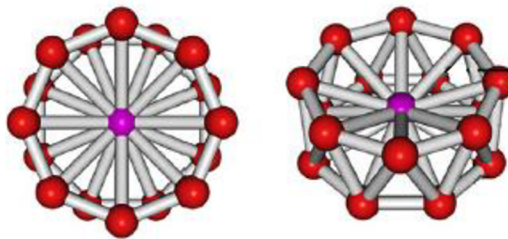


Obr. 19: Molekulová struktura komplexu $[\text{Pr}(\text{18-crown-6})(\text{NO}_3)_3]$ s koordinačním číslem 12.¹⁹

Existují komplexy s většími koordinačními čísly než 12, např. komplex $[\text{Th}(\text{H}_3\text{BNMe}_2\text{BH}_3)_4]$, u něhož koordinační číslo dosahuje hodnoty 15. Pomocí rentgenové a neutronové difrakce bylo objasněno, že k thoriu (CA) je trojice ligandů vázána čtyřmi koordinačně-kovalentními vazbami a čtvrtý ligand pouze třemi vazbami. Donorovými atomy jsou zde atomy vodíku vázané k boru (Obr. 20). Dalším komplexem s neobvykle vysokým koordinačním číslem je $[\text{CoB}_{16}]^-$, u kterého pozorujeme tzv. sendvičovou strukturu. Atom kobaltu je sevřen dvěma molekulami B_8 a koordinační číslo komplexu tak dosahuje hodnoty 16. Výsledný tvar polyedru připomíná tvar bubnu (Obr. 21).^{20,21}



Obr. 20: Molekulová struktura komplexu $[\text{Th}(\text{H}_3\text{BNMe}_2\text{BH}_3)_4]$ (oranžová barva = thorium, béžová barva = bor, modrá barva = vodík, černá barva = uhlík).¹⁸



Obr. 21: Molekulová struktura komplexu $[\text{CoB}_{16}]^-$ (fialová barva = kobalt, červená barva = bor).¹⁹

1.3 Teorie popisující koordinační sloučeniny

Koordinační sloučeniny jsou charakteristické typem chemické vazby. Koordinačně-kovalentní vazba si zachovává kovalentní povahu, ale odlišuje se od vazby kovalentní svým vznikem. U přechodných kovů má však koordinačně-kovalentní vazba složitější podobu, jelikož atom kovu k jejímu vzniku využívá ne zcela obsazené d-orbitaly, popř. f-orbitaly. Pro popis koordinačně-kovalentní vazby bylo vytvořeno více teorií, z nichž jen některé našly uplatnění a jsou ve spojitosti s koordinačními sloučeninami používány. Jedná se o teorii valenčních vazeb, teorii krystalového a ligandového pole a teorii molekulových orbitalů, kterým bude věnována tato kapitola.

1.3.1 Teorie valenčních vazeb

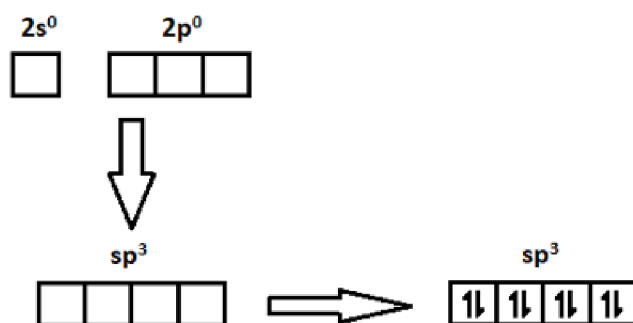
Původní teorií popisující vazbu v koordinačních sloučeninách je teorie valenčních vazeb vytvořená Walterem Heitlerem a Fritzem Londonem v roce 1927, která původně sloužila především k popisu vazby kovalentní. Základní myšlenky teorie vychází z konceptu kovalence vytvořeného Gilbertem N. Lewisem v roce 1916. Koncept kovalence spočívá v tom, že se atomové orbitaly dvou atomů překryjí v důsledku dostatečného přiblížení. Jejich elektrony ve valenční sféře se tak stávají pro oba atomy sdílenými, tj. dochází ke vzniku vazebného elektronového páru a vzniku kovalentní vazby. V roce 1931 byla teorie kovalence doplněna o princip hybridizace atomových orbitalů, který popsal Linus Pauling. Princip hybridizace vysvětluje sjednocení vnějších atomových orbitalů jednotlivých atomů před vznikem chemické vazby, kdy se vytvoří rovnocenné hybridizované atomové orbitaly (dále HAO). U koordinačních sloučenin odpovídají jednotlivým typům hybridizace konkrétní hodnoty koordinačního čísla, z čehož lze vyvodit souvislost geometrie HAO a výsledného tvaru molekuly (viz Tabulka 1).^{22,23,24,25}

Tabulka 1: Přehled koordinačních čísel a tvarů molekul odpovídající jednotlivým typům hybridizace.²⁴

| Typ hybridizace | Koordinační číslo | Možné prostorové uspořádání |
|--------------------------------|-------------------|---|
| sp | 2 | přímka |
| sp ² | 3 | rovnostranný trojúhelník, trigonální pyramida |
| sp ³ | 4 | tetraedr, čtverec |
| sp ³ d | 5 | čtvercová bipyramida, trigonální bipyramida |
| sp ³ d ² | 6 | oktaedr, trigonální prizma |
| sp ³ d ³ | 7 | pentagonální bipyramida, oktaedr s přidaným vrcholem, trigonální prizma s přidaným vrcholem |
| sp ³ d ⁴ | 8 | krychle, dodekaedr, čtvercové antiprizma |
| sp ³ d ⁵ | 9 | čtvercové antiprizma s přidaným vrcholem, struktura „muffin“ |

Hybridizaci atomových orbitalů lze demonstrovat na jednoduchém příkladu komplexního kationtu $[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$. Elektronová konfigurace atomu beryllia v základním stavu je $1s^2 2s^2 2p^0$, beryllnatého kationtu Be^{II} potom $1s^2 2s^0 2p^0$. Atomové orbitály ve vnější sféře, tj. orbitály 2s a 2p, hybridizují za vzniku čtyř rovnocenných HAO sp^3 (Obr. 22), které v prostoru zaujímají pravidelné tetraedrické uspořádání. Následně jsou orbitály sp^3 obsazeny čtyřmi elektronovými páry, které pochází z atomu kyslíku vázaného v molekule vody.²⁶

Elektronová konfigurace Be^{II} : $[\text{He}] 2s^0 2p^0$

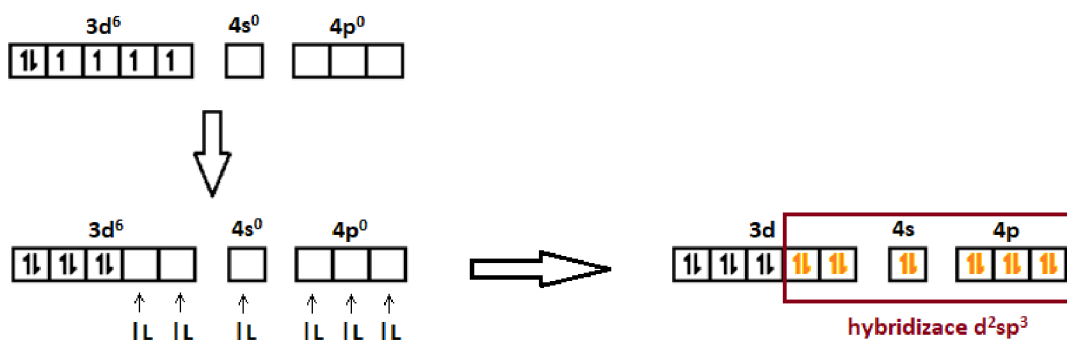


Obr. 22: Schéma hybridizace s a p-orbitálu.

Teorie valenčních vazeb u komplexních sloučenin jde nejlépe využít pro popis oktaedrických komplexů. Příklad aplikace si uvedeme na komplexech $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ a $[\text{CoF}_6]^{3-}$. Zkrácený tvar elektronové konfigurace atomu kobaltu v základní stavu je $[\text{Ar}] 3d^7 4s^2$, kobaltitého kationtu Co^{III} , poté $[\text{Ar}] 3d^6 4s^0$. Atom kobalt má k dispozici volné, energeticky dostupné orbitály 4s a 4p, do nichž může přijímat volné elektronové páry ligandů za vzniku koordinačně-kovalentní vazby.²⁷

V případě kationtu $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ dochází ke spárování šesti elektronů v 3d orbitalu, které byly původně rozmístěny podle pravidla maximální multiplicity. Šest elektronových párů z ligandů následně obsazuje volné valenční orbitály podle rostoucí energie, kdy výsledná hybridizace kationtu $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ je poté d^2sp^3 . Spárování valenčních elektronů kobaltitého kationtu je přisuzováno dostatečnému množství energie, která se uvolnila při tvorbě koordinačně-kovalentních vazeb mezi atomem kobaltu (CA) a molekulami NH_3 . Komplex je diamagnetický, což znamená, že u něj nejsou přítomny nepárové elektrony (Obr. 23).²⁷

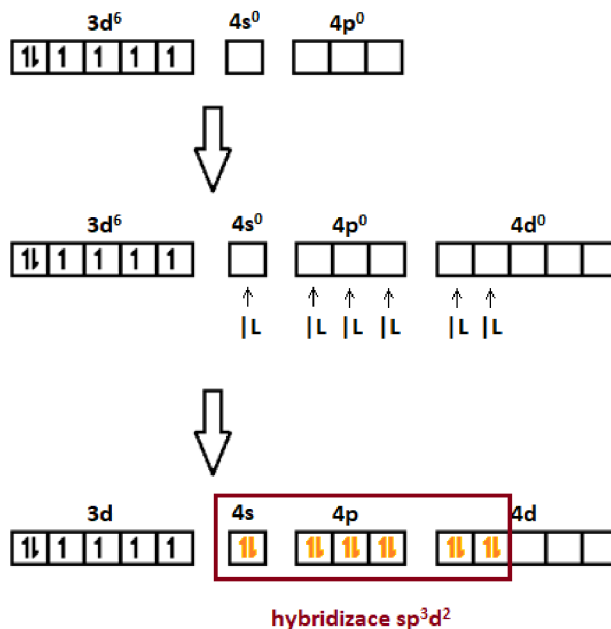
Elektronová konfigurace Co^{III} : $[\text{Ar}] 3d^6 4s^0 4p^0$



Obr. 23: Schéma zaplnění d-orbitalu u komplexu $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$.

U aniontu $[\text{CoF}_6]^{3-}$ je situace odlišná. Ke spárování elektronů v 3d orbitalu nedochází, což znamená donaci elektronových párů do orbitalů 4s, 4p a 4d. Díky přítomnosti nepárových elektronů v orbitalu 3d je komplexní aniont paramagnetický a jeho hybridizace je sp^3d^2 . Teorie valenčních vazeb vysvětluje nespárování elektronů v orbitalu 3d jako důsledek přítomnosti ligandu, který je v případě fluoridového aniontu (F^-) slabou bází (Obr. 24).²⁷

Elektronová konfigurace Co^{III} : $[\text{Ar}] 3d^6 4s^0 4p^0$



Obr. 24: Schéma zaplnění d-orbitalu u aniontu $[\text{CoF}_6]^{3-}$.

S ohledem na využitelnost Teorie valenčních vazeb lze konstatovat, že poměrně jednoduše vysvětluje stereochemii koordinačních sloučenin a jejich magnetické vlastnosti, které souvisí s počtem nepárových elektronů. To, co teorie nedokáže vysvětlit, je tvorba

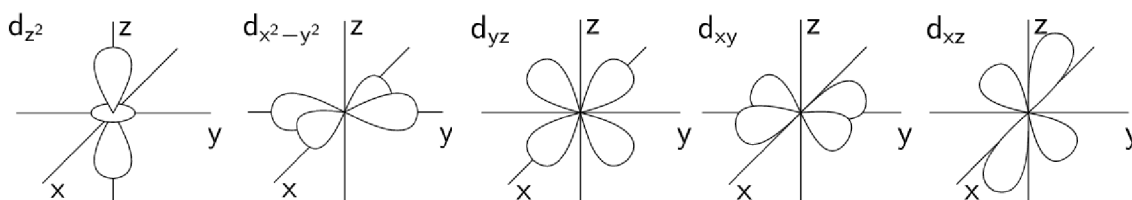
vysokospinových a nízkospinových komplexů, elektronová spektra komplexů nebo jejich reaktivnost.^{27,28}

1.3.2 Teorie krystalového pole

Teorie krystalového pole (dále CFT z anglického Crystal Field Theory) slouží k popisu vazby v krystalických sloučeninách. Podle CFT tvoří vnitřní strukturu krystalu vzájemně se obklopující kationty a anionty uspořádané do krystalové mřížky. Vazba v krystalických sloučeninách je považována za iontovou, kdy kationty a anionty představují bodové náboje působící na sebe elektrostatickými silami. Zároveň CFT opomíjí kovalentní příspěvek vazby mezi ionty.^{27,28,29}

Budeme-li uvažovat povahu CA a ligandu během jejich interakce, je možné výše zmíněné poznatky CFT modifikovat na popis vazby v koordinačních sloučeninách. Ve své podstatě je CA koordinační sloučeniny kladně nabitý atom kovu, tzn. má povahu kationtu, a ligand je díky přítomnosti volného elektronového páru nositelem záporného náboje, tzn. má charakter aniontu. Při interakci, resp. tvorbě koordinačně-kovalentní vazby na sebe působí elektrostatickými silami. Jedná se tedy o čistě elektrostatický model.^{6,27,28,29}

Atomy přechodných kovů mají ve valenční sféře k dispozici pět degenerovaných d-orbitalů, tzn. pět energeticky shodných orbitalů. Jejich prostorové rozmístění v souřadnicovém systému os x , y a z je pro popis koordinačně-kovalentní vazby klíčové. Konkrétně se jedná o orbitály d_{xy} , d_{xz} , d_{yz} , $d_{x^2-y^2}$ a d_{z^2} . Trojice orbitalů d_{xy} , d_{xz} a d_{yz} se rozprostírá v jedné ze tří rovin určených osami souřadnicového systému a jejich laloky se rozkládají v prostoru mezi osami. Naopak orbitály $d_{x^2-y^2}$ a d_{z^2} se rozkládají podél os (Obr. 25).^{6,26}



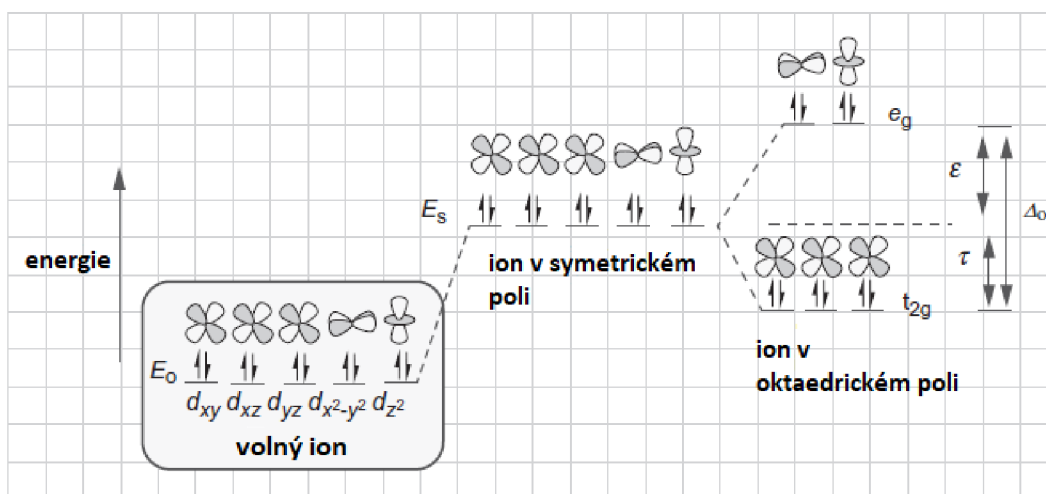
Obr. 25: Rozložení jednotlivých d-orbitalů v souřadnicovém systému os x , y a z .³⁰

Ligandy jakožto bodové náboje indukují elektrostatické pole, které působí na valenční elektrony v d-orbitalu centrálního kovu. Vlivem tohoto elektrostatického pole dochází k energetickému rozštěpení d-orbitalů a tím i ztrátě jejich degenerace. Štěpení

d-orbitalů se u oktaedrických, čtvercových a tetraedrických komplexů liší. Princip štěpení je nejnáze vysvětlitelný na oktaedrických komplexech.⁶

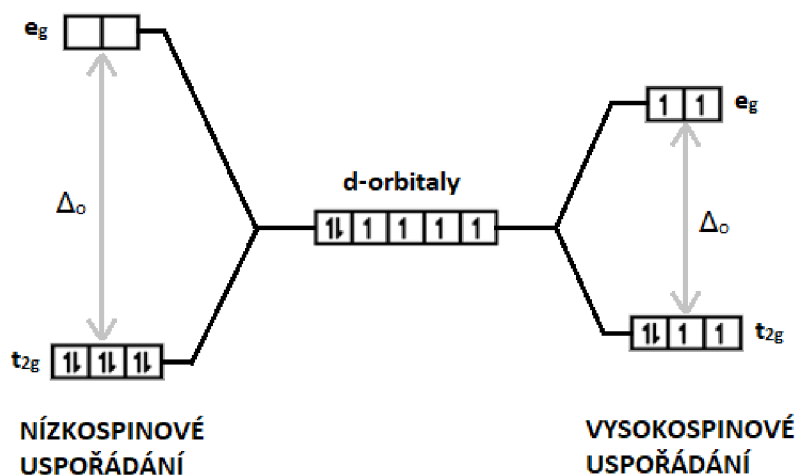
Štěpení d-orbitalů vlivem oktaedrického pole

Oktaedrickým komplexem rozumíme šest ligandů, které se nachází na osách souřadnicového systému a jejichž elektrony vytváří elektrostatické pole působící na elektrony v d-orbitalech centrálního kovu. Lze si představit, že elektrostatické pole ligandů je zpočátku kulově symetrické, což se projeví celkovým zvýšením energie všech degenerovaných orbitalů. Postupným přibližováním ligandů k CA, tj. působením oktaedrického pole dochází k většímu odpuzování elektronů a následnému rozštěpení orbitalů (Obr. 26). Největší vliv elektrostatického pole je pozorován u orbitalů $d_{x^2-y^2}$ a d_{z^2} rozmístěných podél souřadných os, protože tyto orbitály směřují přímo proti ligandům. V důsledku silného odpuzování se energie orbitalů $d_{x^2-y^2}$ a d_{z^2} ve srovnání s energií degenerovaných orbitalů v kulově symetrickém poli zvýší a tyto destabilizované orbitály označujeme jako orbitály e_g . Naproti tomu jsou orbitály d_{xy} , d_{xz} a d_{yz} orientované mezi souřadnicové osy stabilizovány a jejich energie klesne. Orbitály s nižší energií značíme jako t_{2g} (Obr. 26). Energetický rozdíl mezi e_g a t_{2g} orbitály neboli velikost rozštěpení označujeme jako sílu krystalového pole s označením Δ_o , což odpovídá $10 Dq$.^{6,31,32}



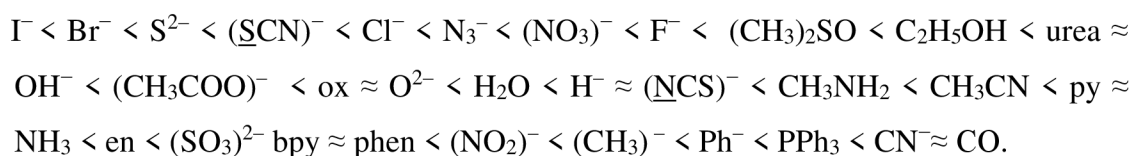
Obr. 26: Štěpení d-orbitalů vlivem elektrostatického pole ligandů (E_0 = energie d-orbitalů v základním stavu, E_s = energie d-orbitalů v symetrickém poli ligandů, e_g = d-orbitály s vyšší energií v oktaedrickém poli, t_{2g} = d-orbitály s nižší energií v oktaedrickém poli, Δ_o = rozdíl energií mezi e_g a t_{2g}).²⁹

Zaplňování orbitalů elektrony je dáno výstavbovým principem, Pauliho pravidlem výlučnosti a Hundovým pravidlem maximální multiplicity. V případě energeticky rozštěpených d-orbitalů je však jejich zaplňování ovlivněno velikostí Δ_o , kdy atomy kovů s konfigurací d^4 , d^5 nebo d^6 mohou vytvářet tzv. vysokospinové nebo nízkospinové uspořádání. Pokud bude síla krystalového pole dostatečně velká, pak energie elektronů nebude stačit k překonání energetického rozdílu a dojde ke spárování elektronů v orbitalech t_{2g} , i když by podle Hundova pravidla měly zůstat nepárovými. Takové koordinační sloučeniny nazýváme jako nízkospinové. Jestliže je energetický rozdíl rozštěpených orbitalů v porovnání s energií elektronů nižší, dochází k zaplňování orbitalů v souladu s pravidly a vzniká komplex vysokospinový (Obr. 27).^{6,9,30}



Obr. 27: Rozdíl v obsazování d-orbitalů ovlivněný silou ligandového pole.

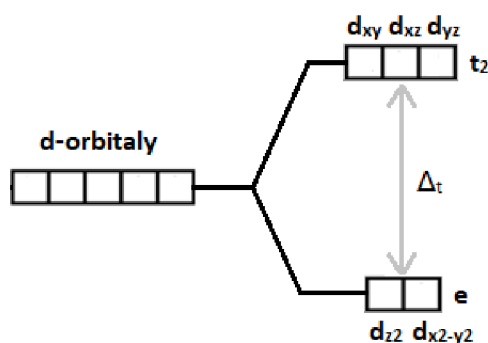
Energetické rozštěpení d-orbitalů, a tedy i síla krystalového pole závisí na typu ligandu, typu centrálního atomu a jeho oxidačním stavu. Podle vzrůstající hodnoty Δ_o se ligandy řadí do tzv. spektrochemické řady ligandů, kde síla krystalového pole roste ve směru zleva doprava:



Takto seřazené ligandy působí na d-orbitaly stejně bez ohledu na typ centrálního kovu a oxidačního stavu.^{6,28,33}

Štěpení d-orbitalů vlivem tetraedrického pole

Tetraedrické pole ligandů vzniká u komplexů se čtyřmi ligandy vázanými na CA, které zaujímají v prostoru tetraedrické uspořádání. Ani jeden z ligandů neleží na osách x , y a z souřadnicového systému, což znamená, že ani jeden z d-orbitalů centrálního kovu nesměřuje přímo proti některému z ligandů. Tetraedrické krystalové pole způsobuje také rozštěpení d-orbitalů, avšak výsledné energie orbitalů se od rozštěpení oktaedrickým polem liší. K ligandům v prostoru jsou blíže orbitály d_{xy} , d_{xz} a d_{yz} , a proto jejich energie vzroste. U orbitalů $d_{x^2-y^2}$ a d_{z^2} je vliv tetraedrického krystalového pole menší a jejich energie se oproti průměrné energii d-orbitalu sníží (Obr. 28).^{5,6}

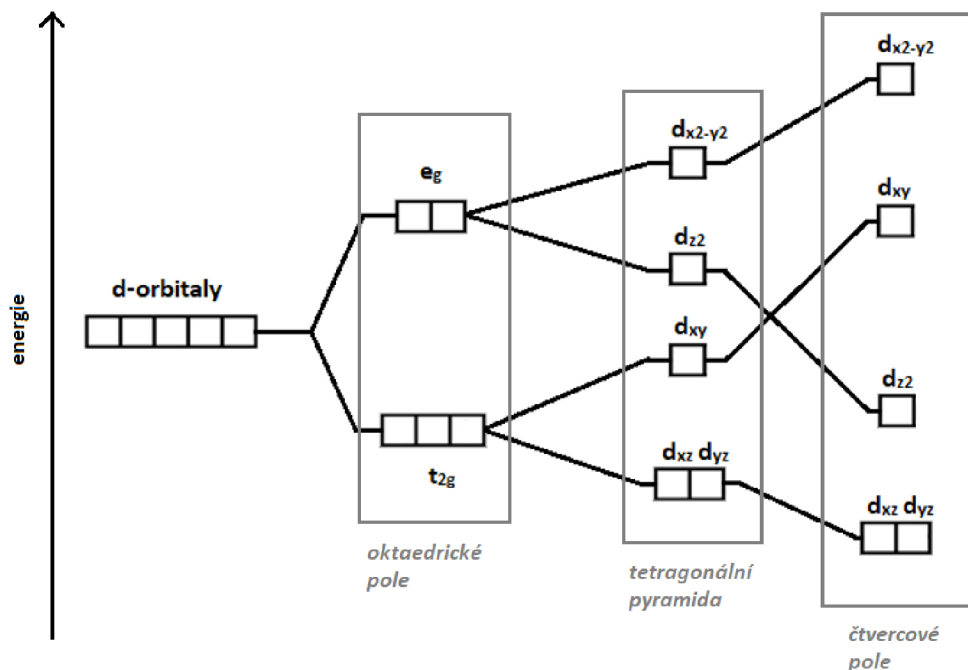


Obr. 28: Rozštěpení d-orbitalů vlivem tetraedrického pole.

Experimentálně bylo zjištěno, že štěpení tetraedrických komplexů Δ_t je ve srovnání se štěpením oktaedrických komplexů Δ_o mnohem menší, což odpovídá za výsledné vysokospinové uspořádání tetraedrického komplexu.^{6,34,35}

Štěpení d-orbitalů vlivem tetragonálního (čtvercového) pole

Tetragonální neboli čtvercové krystalové pole ligandů lze jednoduše odvodit od pole oktaedrického, kdy ligandy ležící na ose z odstraníme. Tím se energie orbitalů d_{xz} , d_{yz} a d_{z^2} stabilizuje a výsledné energetické hladiny d-orbitalů po rozštěpení se změni dle Obr. 29.⁶



Obr. 29: Schematické znázornění energetického rozštěpení d-orbitalů v oktaedrických, tetraedrických a tetragonálních komplexech.

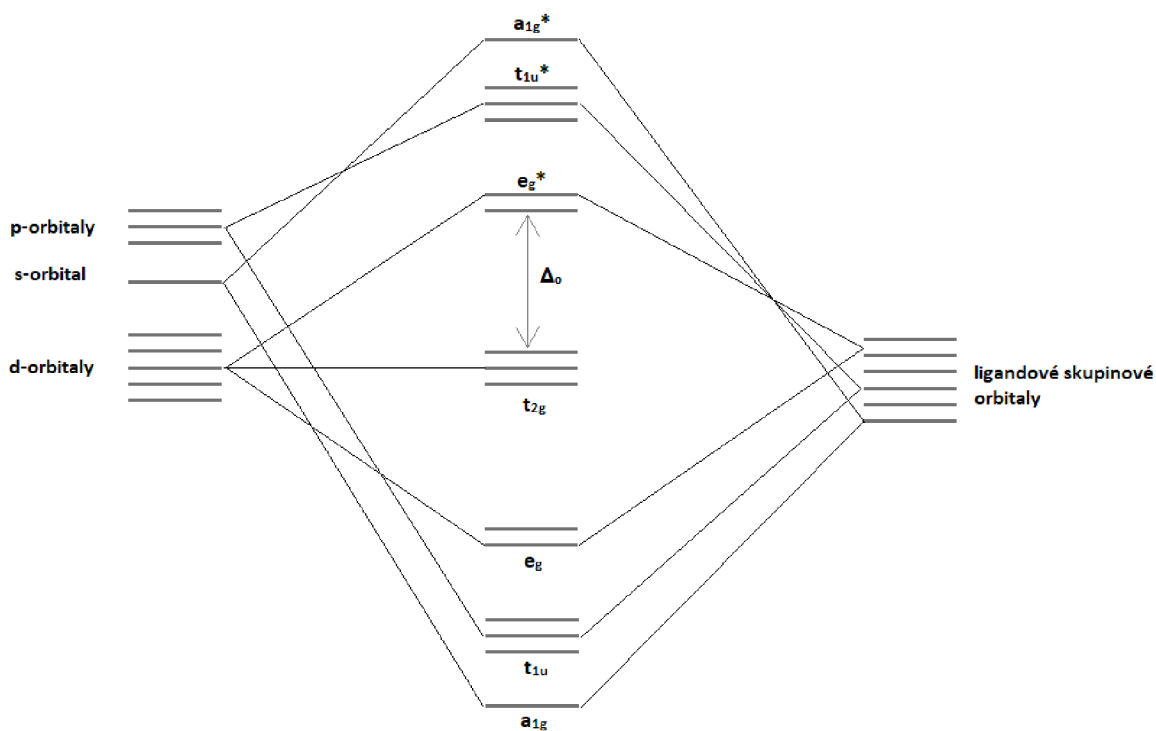
Teorie krystalového pole velmi výstižně vysvětluje elektronové poměry v koordinačních sloučeninách, s nimiž souvisí i magnetické vlastnosti komplexů. Zároveň dokáže objasnit i vznik vysokospinových i nízko-spinových uspořádání a vliv ligandů související s jejich pozicí ve spektrochemické řadě ligandů. Samotné pořadí, tj. proč jsou ligandy seřazeny do této konkrétní řady nebo proč aniont ovlivňuje d-orbitály méně než neutrální molekula (porovnání Br^- a CO), však teorie nevysvětluje.^{6,27,28}

1.3.3 Teorie molekulových orbitalů a teorie ligandového pole

K popisu vazby se využívá i teorie molekulových orbitalů (dále MOT z anglického Molecular Orbital Theory), která je založena na vzniku molekulových orbitalů (dále MO) z atomových orbitalů atomů tvořících vazbu. Nově vzniklé MO jsou společné pro celou molekulu a jejich počet odpovídá počtu kombinujících se atomových orbitalů. Energie jednotlivých MO je vzájemně odlišná a zároveň se liší i ve srovnání s původními atomovými orbitály, jejichž kombinací vznikly. MO s nižší energií nazýváme vazebné orbitály a MO s vyšší energií protivazebné orbitály.^{5,30}

Jestliže použijeme MOT k popisu vazby v koordinačních sloučeninách nazýváme ji Teorie ligandového pole (dále LFT z anglického Ligand Field Theory). LFT se od CFT odlišuje tím, že kromě elektrostatického působení bere v úvahu i interakci mezi valenčními

orbitály CA a ligandů. Tento model je schopen pojmut jak existenci σ vazeb, tak vazeb π . Grafickým znázorněním MO jsou tzv. diagramy MO se svojí charakteristickou strukturou – na okrajích diagramu jsou uvedeny samostatné atomové orbitály před kombinací a uprostřed leží MO uspořádané s ohledem na energetické rozdíly. V dolní části uprostřed se nachází vazebné MO a nahoře pak protivazebné MO, které se navíc značí hvězdičkou umístěnou vpravo nahoře u symbolu orbitalu (např. protivazebný orbital e_g značíme e_g^*). Jako příklad si uvedeme obecný diagram MO pro oktaedrický komplex ML_6 (Obr. 30). Na levém okraji jsou znázorněny valenční atomové orbitály CA, kdy pro vazby s šesti ligandy je třeba kombinovat orbitály s, p i d. Na pravém okraji se nachází šest tzv. ligandových skupinových orbitalů a_{1g} , t_{1u} a e_g , z nichž každý pochází od jednoho z ligandů. Kombinace atomových orbitalů vede ke vzniku šesti vazebných orbitalů s nižší energií a šesti orbitalů protivazebných, které jsou energeticky bohatší než původní atomové orbitály. V prostřední části diagramu si lze také všimnout orbitalů t_{2g} , jenž svoji energii oproti původním atomovým orbitalům příliš nezměnily. Jedná se o zbývající d-orbitály, které se neúčastní kombinace s atomovými orbitály ligandů, označované jako nevazebné orbitály. Energetický rozdíl nevazebných orbitalů t_{2g} a protivazebných orbitalů e_g^* odpovídá síle krystalového pole Δ_o .^{5,6,27,28,30,36}

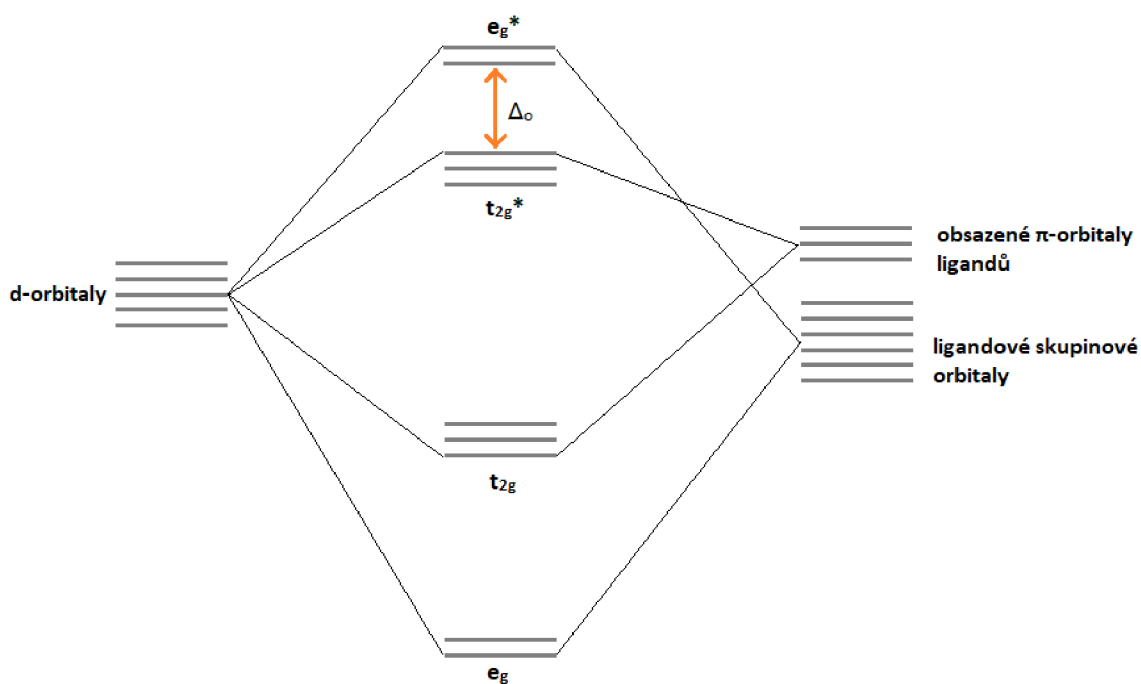


Obr. 30: Diagram molekulových orbitalů oktaedrického komplexu ML_6

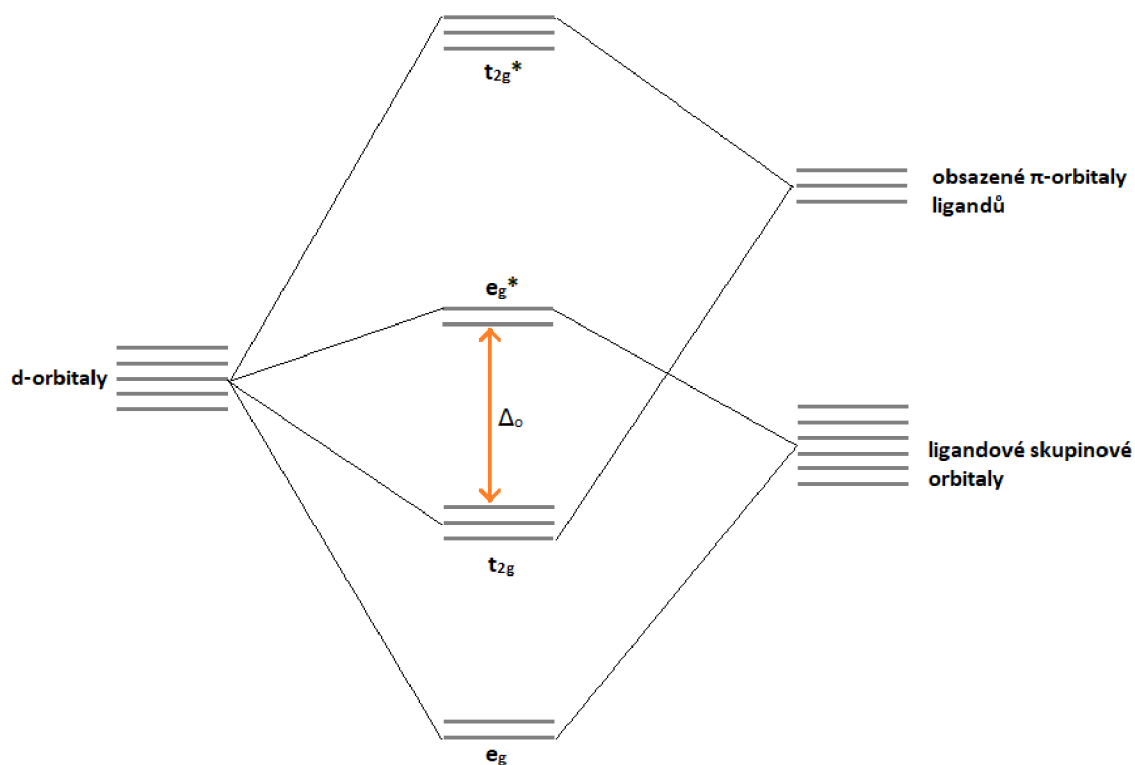
(a_{1g} , t_{1u} , e_g = vazebné MO; t_{2g} = nevazebný MO; e_g^* , t_{1u}^* , a_{1g}^* = protivazebné MO; Δ_o = síla ligandového pole).

V případě oktaedrického komplexu ML_6 jsme uvažovali šest ligandů spojených s CA prostřednictvím šesti σ vazeb. Nevazebné orbitály t_{2g} se vzhledem ke své prostorové orientaci mohou překrývat i s orbitály ligandu za vzniku vazby π . K takové interakci dojde tehdy, jestliže ligand disponuje volnými elektronovými páry nebo má volné orbitály a dochází k donaci elektronů z CA do volných orbitalů ligandu.^{6,9}

První zmíněný typ ligandů označujeme jako π -donory (např. Cl^- , Br^- , O^{2-} , atd.), druhý jako π -akceptory (např. CO, ethen, CN^-). Přiblížíme-li si vznik π vazby v diagramu MO, kombinují se vazebné π -orbitály ligandů na pravém okraji nad σ -orbitály s orbitály d_{xy} , d_{xz} a d_{yz} (nevazebné t_{2g} orbitály) za vzniku vazebných t_{2g} orbitalů a protivazebných t_{2g}^* orbitalů. Pokud je ligand π -donorem, za sílu ligandového pole Δ_o je považován energetický rozdíl orbitalů t_{2g}^* a e_g^* (Obr. 31). V případě π -akceptorových ligandů odpovídá síle ligandového pole Δ_o rozdíl t_{2g} a e_g^* (Obr. 32).^{6,9}



Obr. 31: Neúplný diagram MO zaměřený na interakce CA a ligandu typu π -donor.



Obr. 32: Neúplný diagram MO zaměřený na interakce CA a ligandu typu π -akceptor.

1.4 Vybrané způsoby přípravy koordinačních sloučenin

Při syntéze koordinačních sloučenin se vychází z několika jednoduchých typů reakcí, dle kterých lze rozlišit čtyři základní typy příprav koordinačních sloučenin. Nejčastěji využívaný způsob přípravy je založen na substitučních reakcích, které mohou probíhat v různých typech rozpouštědel. Vzniku komplexní sloučeniny lze docílit i oxidací nebo redukcí centrálního atomu kovu.⁵

1.4.1 Přípravy koordinačních sloučenin založené na substitučních reakcích

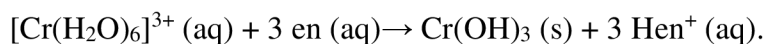
Mezi často využívané způsoby přípravy koordinačních sloučenin patří substituční reakce, kdy dochází k záměně ligandu v koordinační sféře komplexní sloučeniny. Tyto reakce mohou probíhat ve vodném či naopak bezvodném prostředí. Jako výchozí látky jsou využívány hydratované soli kovových iontů (chloridy, sírany nebo dusičnany) nebo bezvodé jednoduché soli (halogenidy), které jsou však často polymerní.¹⁰

Substituční reakce ve vodném prostředí jsou nejčastějším způsobem přípravy, při němž se smíchá vodný roztok ligandu a vodný roztok soli příslušného kovu. Kationty kovu mají ve vodném roztoku podobu aquakomplexů, tj. koordinačních kationtů, v nichž se na

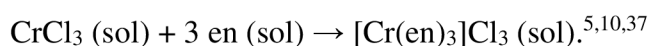
kationt kovu vázou molekuly vody prostřednictvím koordinačně-kovalentní vazby, např. $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. Reakce je založena na principu substituce molekuly vody (aqua ligandu) v koordinační sféře za jiný ligand, přičemž počet substituovaných molekul vody může být různý. Oxidační číslo kovu a koordinační číslo zůstávají během reakce nezměněny. Výměna ligandu se projeví změnou zbarvení reakční směsi, což lze vnímat jako signál změny v koordinační sféře. Příkladem tohoto typu přípravné reakce je substituce molekul vody z hexaaquaměďnatého kationtu za molekuly amoniaku, tj. za vzniku amminokomplexní částice:^{10,32,37}



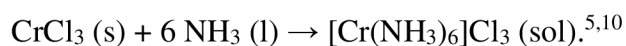
K syntéze koordinačních sloučenin může být využito i nevodné rozpouštědlo. Důvodem pro volbu jiného rozpouštědla bývá např. nesnadná substituce molekul vody v koordinační sféře CA či ovlivnění pH vodného roztoku po přidavku roztoku ligandu. Změna pH se projeví vysrážením hydroxidu nebo hydratovaného oxidu příslušného kovu, čemuž lze předejít použitím bezvodého rozpouštědla, jako je např. 1,2-ethylendiamin (en), dimethylformamid nebo acetonitril. Například při reakci chromitého kationtu s 1,2-ethylendiaminem ve vodném prostředí dochází k vyloučení hydroxidu chromitého ve formě sraženiny podle rovnice:



Jestliže výše zmíněná reakce proběhne v bezvodém rozpouštědle, např. v etheru, produkt reakce se bude lišit:



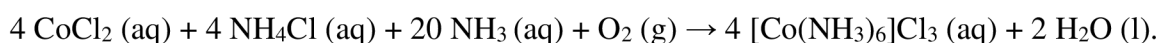
Posledním typem reakce, kterou řadíme mezi substituční způsoby přípravy koordinačních sloučenin, je substituční reakce bez použití rozpouštědla. V případě, že používaný ligand má kapalný charakter, může být zároveň využit jako rozpouštědlo reakce. Nadbytek ligandu v reakční směsi se odstraní odpařením, popř. destilací. Příkladem kapalného ligandu, který se používá v reakci současně jako rozpouštědlo, je amoniak:



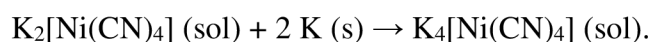
1.4.2 Přípravy koordinačních sloučenin založené na oxidaci a redukci

Při syntéze koordinačních sloučenin lze využít i oxidačně-redukčních procesů, protože přechodné kovy vystupují v koordinačních sloučeninách v různých oxidačních stavech.

Další možností přípravy komplexů je tedy oxidace přechodného kovu doprovázená substituční reakcí. Tento způsob bývá využíván např. u komplexních sloučenin kobaltu, kdy se vychází z kobaltnaté soli Co^{II} . Kobaltnaté soli jsou kineticky labilní a v důsledku toho rychle reagují, čehož se využívá při koordinaci ligandů a následné oxidaci na Co^{III} . Oxidaci lze provést vhodným oxidačním činidlem, např. přidavkem peroxidu vodíku, nebo postačí dostatečně dlouhou dobu probublávat reakční směs vzdušným kyslíkem. Příkladem je reakce vodného roztoku kobaltnaté soli s amoniakem v prostředí chloridu amonného, kdy vzniká hexaamminkobaltnatý kationt, jenž následně podléhá oxidaci kyslíkem na hexaamminkobaltitý kationt:^{5,10}

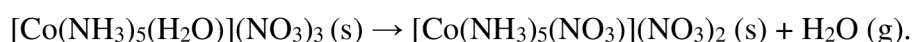


Koordinační sloučeniny s centrálním atomem v nízkém oxidačním stavu se připravují redukcí. Východí sloučeninu představuje komplex s centrálním atomem v jeho běžném stabilním oxidačním stavu, který je redukován vhodným redukčním činidlem. Aby nedošlo ke zpětné oxidaci kovu, je potřebné vznikající komplex ochránit před potencionálním oxidačním činidlem, např. vzdušným kyslíkem. Příkladem tohoto způsobu přípravy je redukce tetrakyanidonikelnatanu draselného kovovým draslíkem v kapalném amoniaku, kdy vzniká tetrakyanidonikl draselný. Při reakci je nikelnatý kationt Ni^{II} redukován na nikel v oxidačním stavu 0: ^{5,10,37}



1.4.3 Ostatní způsoby přípravy

Výše zmíněné způsoby syntéz koordinačních sloučenin představují ty často využívané. Mezi další možnosti přípravy patří také např. tepelný rozklad již existující komplexní sloučeniny, jenž může nastat v případě přítomnosti koordinované částice, která se po zahřátí uvolní. Příkladem reakce je tepelný rozklad dusičnanu pentaamminaquakobaltitého $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})](\text{NO}_3)_3$, kdy po zahřátí dojde u uvolnění koordinované molekuly vody za vzniku dusičnanu pentaamminnitratokobaltitého a molekuly vody:¹¹



2 DIDAKTICKÁ ČÁST

2.1 Kurikulární dokumenty České republiky

Rámcové vzdělávací programy (dále RVP) společně s Národním programem rozvoje vzdělávání v České republice neboli Bílou knihou představují nejdůležitější kurikulární dokumenty týkající se českého školství. Vypracování RVP stanovuje zákon č. 561/2004 Sb., o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělávání, a za jejich tvorbu zodpovídá Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. Cílem RVP je vymezení obsahu, rozsahu a podmínek vzdělávání pro jednotlivé etapy školního vzdělávání ve všeobecné i odborné rovině. Zároveň RVP stanovují konkrétní cíle, formy, délku vzdělávání a jeho povinný obsah. Dále také podmínky průběhu vzdělávání, ukončování vzdělávání, profesní profil absolventa školy a podmínky potřebné pro vzdělávání žáků se speciálními vzdělávacími potřebami.^{38,39}

Podle jednotlivých etap školního vzdělávání rozlišujeme RVP pro předškolní vzdělávání, RVP pro základní vzdělávání, RVP pro gymnázia, RVP pro střední odborné vzdělávání a ostatní RVP. Úroveň dosahu RVP je celostátní, a proto bylo nutné vytvořit i školní úroveň. Školní úroveň kurikulární dokumentů tvoří tzv. školní vzdělávací programy (dále ŠVP), které si jednotlivé školy vypracovávají samostatně na základě příslušných RVP. Do ŠVP školy reflektují jejich konkrétní podmínky vzdělávání, své záměry i plány do budoucna. Samostatné vypracování ŠVP umožňuje školám využít svůj potenciál a dává jim prostor k seberealizaci.^{38,40,41}

2.2 Koordinační sloučeniny v RVP

Při zasazení tématu koordinačních sloučenin do systému RVP je nutné poznamenat, že svou obtížností spadá problematika komplexů do středoškolské úrovně učiva chemie. Odpovídajícími RVP jsou RVP pro gymnázia (dále RVP G) a RVP pro střední odborné vzdělávání (dále RVP SOV), avšak vzhledem k velkému množství dílčích RVP SOV byl pro účely této diplomové práce vybrán jen RVP G.

RVP G rozděluje vzdělávací obsah studia gymnázia do osmi vzdělávacích oblastí, konkrétně se jedná o vzdělávací oblasti Jazyk a jazyková komunikace, Matematika a její aplikace, Člověk a příroda, Člověk a společnost, Člověk a svět práce, Umění a kultura, Člověk a zdraví a poslední vzdělávací oblastí je Informatika a informační a komunikační technologie. Vzdělávací oblast v sobě zahrnuje jeden nebo více vyučovacích předmětů.

Chemii jako vyučovací předmět řadíme do vzdělávací oblasti Člověk a příroda společně s biologií, fyzikou, geografii a geologií.³⁹

Vzdělávací obsah předmětu Chemie rozděluje chemické učivo do čtyř oddílů, u nichž jsou vždy charakterizovány tzv. očekávané výstupy, kterých by měl dosáhnout každý žák příslušné úrovně vzdělávání. Již zmíněnými čtyřmi oddíly jsou obecná chemie, anorganická chemie, organická chemie a biochemie. Za účelem zvýšení autonomie škol jsou očekávané výstupy i učivo jednotlivých oddílů sepsány heslovitě. Téma koordinačních sloučenin bude pravděpodobně zahrnuto do oddílu anorganické chemie a učiva „d- a f-prvky a jejich sloučeniny“ (Obr. 33).³⁹

ANORGANICKÁ CHEMIE

Očekávané výstupy

žák

- ▶ využívá názvosloví anorganické chemie při popisu sloučenin
- ▶ charakterizuje významné zástupce prvků a jejich sloučeniny, zhodnotí jejich surovinové zdroje, využití v praxi a vliv na životní prostředí
- ▶ předvídá průběh typických reakcí anorganických sloučenin
- ▶ využívá znalosti základů kvalitativní a kvantitativní analýzy k pochopení jejich praktického významu v anorganické chemii

Učivo

- vodík a jeho sloučeniny
- s-prvky a jejich sloučeniny
- p-prvky a jejich sloučeniny
- d- a f-prvky a jejich sloučeniny

Obr. 33: Rozpracování vzdělávacího oddílu anorganická chemie v RVP G.³⁹

2.3 Koordinační sloučeniny v ŠVP

Rozpracování vzdělávacích oblastí RVP do konkrétní podoby ŠVP provádí každá škola samostatně. Obsah ŠVP musí povinně vycházet a zároveň být v souladu s příslušným RVP. Ve výsledné podobě jsou ŠVP veřejně přístupné dokumenty, které školy zveřejňují zpravidla na svých webových stránkách nebo jsou k nahlédnutí na vyžádání přímo ve školách.³⁸

Pro orientační zhodnocení zařazení tématu Koordinační sloučeniny do ŠVP bylo vybráno celkem pět ŠVP gymnázií v České republice, konkrétně ŠVP ze škol:

- Masarykovo gymnázium, Střední zdravotnická škola a Vyšší odborná škola zdravotnická Vsetín
- Slovanské gymnázium Olomouc
- Gymnázium Olomouc – Hejčín
- Gymnázium Slovanské náměstí Brno
- Gymnázium Elišky Krásnohorské v Praze

2.3.1 Koordinační sloučeniny v ŠVP Masarykova gymnázia, Střední zdravotnické školy a Vyšší odborné školy zdravotnické Vsetín

Masarykovo gymnázium, Střední zdravotnická a Vyšší odborná škola zdravotnická škola Vsetín zpracovala svůj ŠVP pro jednotlivé předměty zvlášť. V ŠVP pro osmileté a čtyřleté gymnázium je předmět chemie rozpracován do jednotlivých ročníků. Poznatky o koordinačně-kovalentní vazbě budou podle ŠVP zahrnuty v učivu věnující se chemické vazbě v rámci 1. ročníku (kvinty). Dále se ŠVP zmiňuje o koordinačních sloučeninách v souvislosti s výukou chemie d- a f-prvků ve 2. ročníku, kdy je zde stanovena výuka názvosloví koordinačních sloučenin (Obr. 34). Učivo koordinačních sloučenin je také zahrnuto v ŠVP volitelných předmětů, tj. v předmětu „Seminář z chemie“.^{42,43}

| Vyučovací předmět | Chemie |
|---|---|
| Ročník | 2. ročník |
| Výstupy | Učivo |
| <p>žák</p> <p>objasní princip periodické soustavy prvků, rozpozná vybrané kovy, polokovy a nekovy a usuzuje na jejich možné vlastnosti</p> <p>ovládá princip tvorby názvů anorganických sloučenin a využívá názvosloví při popisu sloučenin</p> <p>charakterizuje jednotlivé skupiny periodického systému, aplikuje znalosti struktury elektronového obalu na vlastnosti jednotlivých prvků</p> <p>na základě znalosti vlastností vybraných prvků a vzniku chemické vazby dokáže odvodit a vyzkoušet vlastnosti a chování jejich sloučenin</p> <p>aplikuje a prokazuje znalosti chemické kinetiky a termodynamiky na průběh chemických reakcí prvků a jejich sloučenin</p> <p>zhodnotí surovinové zdroje pro výrobu prvků a technologicky důležitých sloučenin, dokáže vybrat a vysvětlit princip nejefektivnějšího způsobu výroby a způsobu přípravy a vyhodnotit zátěž na životní prostředí</p> | <p>Chemie s-prvků</p> <p>Charakteristika prvků I. A a II. A skupiny</p> <p>Vlastnosti sodíku, draslíku a jejich sloučenin.</p> <p>Vlastnosti hořčíku, vápníku a jejich sloučenin.</p> <p>Chemie p-prvků</p> <p>Charakteristické fyzikální a chemické vlastnosti p-prvků a jejich sloučenin.</p> <p>Klasifikace p-prvků.</p> <p>Zařazení p-prvků s kovovým a nekovovým charakterem v periodické soustavě prvků.</p> <p>Prvky III. A skupiny (zvl. bor, hliník).</p> <p>Prvky IV. A skupiny (zvl. uhlík, křemík).</p> <p>Prvky IV. A skupiny (zvl. cín, olovo).</p> <p>Prvky V. A skupiny.</p> <p>Prvky VI. A skupiny – chalkogeny (kyslík).</p> <p>Prvky VI. A skupiny – chalkogeny (síra).</p> <p>Prvky VII. A skupiny – halogeny.</p> <p>Prvky VIII. A skupiny – vzácné plyny.</p> <p>Chemie d- a f-prvků</p> <p>Obecná charakteristika d- a f - prvků .</p> <p>Názvosloví koordinačních sloučenin.</p> <p>Prvky skupiny chromu, manganu a jejich sloučeniny.</p> <p>Prvky triády železa</p> <p>Sloučeniny prvků triády železa.</p> <p>Prvky skupiny mědi a zinku a jejich sloučeniny</p> <p>Chemie f-prvků (základní poznatky).</p> |

Obr. 34: Ukázka ŠVP Masarykova gymnázia, Střední zdravotnické školy a Vyšší odborné školy zdravotnické Vsetín.⁴²

2.3.2 Koordinační sloučeniny v ŠVP Slovanského gymnázia Olomouc

Ve ŠVP Slovanského gymnázia Olomouc jsou vzdělávací obsahy zpracovány podle předmětů, v rámci předmětů pak do ročníků. Rozdělení učiva je formulováno především z hlediska očekávaných výstupů žáka a tomu odpovídající učivo je zmíněno pouze v bodech (Obr. 35). Konkrétní zmínku o koordinačních sloučeninách nalezneme v části ŠVP věnované volitelných předmětů, konkrétně se jedná o předměty Bioanorganická chemie, Chemie vybraných d-prvků a Seminář z chemie.⁴⁴

| 1. ročník + kvinta | Učivo: | Školní výstup – žák: | Poznámky |
|--|--|---|--------------------------------------|
| Téma: | | | |
| OBEČNÁ CHEMIE ÚVOD DO STUDIA CHEMIE | Soustavy látek a jejich složení, prvky, sloučeniny. Klasifikace směsí a metody jejich separace. Oxidační číslo, názvosloví anorganických sloučenin, hmotnost atomů a molekul, látkové množství, výpočty z chemických vzorců. | Využívá odbornou terminologii při popisu látek a vysvětlování chemických dějů. Chápe podstatu základních separačních metod. Používá správně názvy anorganických sloučenin. Definuje pojem látkové množství. Provádí základní chemické výpočty a uplatňuje je při řešení praktických problémů. | PT–VMEaGS – významní Evropané –věda) |

Obr. 35: Ukázka ŠVP Slovanského gymnázia Olomouc.⁴⁴

2.3.3 Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Olomouc – Hejčín

ŠVP Gymnázia Olomouc – Hejčín je rozdělen do předmětů, v nichž jsou přehledně zpracována témata s očekávanými výstupy a učivem do jednotlivých ročníků (Obr. 36). Koordinační sloučeniny tvoří samostatné téma, které spadá do výuky 2. ročníku vyššího nebo čtyřletého gymnázia. Součástí tématu je učivo o koordinačně-kovalentní vazbě, základních pojmech komplexní chemie a názvosloví. Výuka názvosloví koordinačních sloučenin je zmíněna i jako součást Semináře z chemie, který je jedním z volitelných předmětů gymnázia.^{45,46}

| Ročník: II. a VI. | | | |
|-----------------------------|---|--|----------|
| Téma | Výstup předmětu | Učivo | Poznámky |
| Komplexní sloučeniny | <ul style="list-style-type: none"> - aplikuje poznatky z obecné chemie o koordinačně-kovalentní vazbě - využívá pojmy centrální atom, ligand, koordinační číslo - zná názvosloví komplexních sloučenin | Koordinačně-kovalentní vazba Komplexní sloučeniny | |

Obr. 36: Ukázka ŠVP Gymnázia Olomouc – Hejčín.⁴⁵

2.3.4 Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Slovanské náměstí Brno

Gymnázium Slovanské náměstí Brno rozděluje vzdělávací obsah ŠVP do jednotlivých vyučovacích předmětů. U vyučovacích předmětů Chemie je dbán důraz především na školní výstupy, kterých by měli žáci dosáhnout. K výstupům je zde v bodech velmi obecně přiřazeno učivo, které k osvojení konkrétních výstupů vede (Obr. 37). Problematiku

koordinačních sloučenin nalezneme ve výstupech směřujících k osvojení stavby molekul a chemického děje, tj. učivo o chemické vazbě.⁴⁷

Vzdělávací obsah vyučovacího předmětu: Chemie

| ŠKOLNÍ VÝSTUPY | Učivo |
|---|-------------------------------------|
| Žák – aplikuje chemickou terminologii při popisu základních chemických pojmů. | Klasifikace a struktura látek |
| Žák – rozlišuje směsi a chemické látky; – vypočítá složení roztoků, připraví prakticky roztok daného složení; – vysvětlí základní faktory ovlivňující rozpouštění pevných látek; – navrhne postupy a prakticky provede oddělování složek směsí o známém složení, – uvede příklady oddělování složek v praxi. | Disperzní soustavy a jejich složení |

Obr. 37: Ukázka z ŠVP Gymnázia Slovanské náměstí Brno.⁴⁷

2.3.5 Koordinační sloučeniny v ŠVP Gymnázia Elišky Krásnohorské Praha

Obdobně jako u předchozích ŠVP je obsah ŠVP Gymnázia Elišky Krásnohorské rozdělen na jednotlivé vzdělávací obory, tj. vyučovací předměty, a v rámci vzdělávacích oborů na jednotlivé ročníky (Obr. 38). Ve vzdělávacím oboru Chemie je obsah učiva charakterizován příliš obecně. Koordinační sloučeniny v ŠVP tohoto gymnázia zmíněny nejsou.⁴⁸

| Vzdělávací oblast | Vzdělávací obor | 1. ročník | poznámky |
|--|-----------------|---|---|
| Člověk a příroda | Chemie | Učivo | Mezipředmětové vztahy Průřezová témata |
| Očekávané výstupy | Obsah předmětu | | |
| Rozliší jednotlivé typy vzorců Vysvětlí pojem oxidační číslo Předvídá vlastnosti prvků na základě poznatků o PSP Objasní vznik chemické vazby Využívá znalostí o chemických vazbách k předvídání některých vlastností látek Provádí chemické výpočty a uplatňuje je při řešení praktických problémů | Obecné chemie | Bezpečnost práce v chemii Soustavy látek a jejich složení Periodická soustava prvků Stavba atomu Chemická vazba a vlastnosti látek Veličiny a výpočty v anorganické chemii | PT: 1.2 Sebereg., organ. dovednosti a efektivní řešení problémů (např. 1.2.6) |

Obr. 38: Ukázka ze ŠVP Gymnázia Elišky Krásnohorské.⁴⁸

2.4 Analýza učiva koordinačních sloučenin ve středoškolských učebnicích

Učebnici lze považovat za typ knižní publikace, která má své nezastupitelné místo mezi učebními pomůckami používanými ve vzdělávacím procesu. Obecně jsou učebnice považovány za základní didaktické pomůcky, které přispívají k rozvoji lidského poznání. Funkcí učebnice je nést informace v ucelené podobě a sloužit tak jako zdroj poznatků. Jako důležitá vlastnost je vnímána forma zpracování informací, resp. struktura učebnice a její vizuální koncept, které jsou při práci s učebnicí také velmi důležité. Svým pojetím by kvalitní učebnice měla žáky motivovat k učení a podporovat jejich zvědavost. Učebnice mají nemalý význam také pro učitele, kteří je využívají při přípravě výuky, popř. při výuce samotné.^{49,50,51}

Chceme-li hodnotit obsahovou stránku učebnic, je třeba předem zvolit hodnocená kritéria a odpovídající bodovou stupnici. Vybrané středoškolské učebnice chemie byly hodnoceny v kategoriích, které zahrnují jak obsahovou stránku učebnice, tak její strukturu, srozumitelnost a grafické zpracování.⁵⁰

První hodnocenou kategorií je obsah učebnic, který by měl být v souladu s kurikulárními dokumenty, tj. ŠVP a RVP, a zároveň musí odpovídat stanoveným cílům vzdělávání. Obsahová stránka učebnic, resp. obsah věnovaný problematice koordinačních sloučenin, byl posuzován podle rozsahu, odborné správnosti a logické návaznosti učiva. Pro žáky, kteří s učebnicemi pracují, je velmi důležitá srozumitelnost učebnice, která představuje druhou vybranou kategorii. Srozumitelnost textu byla posuzována podle obtížnosti textu a celkové čtivosti. Další hodnocenou kategorií byla struktura, která se nejvíce odráží v přehlednosti učebního textu. Nedílnou součástí učebnic jsou obrázky, grafy nebo jiná grafická obohacení, která zvyšují názornost učiva. Ve vztahu k chemii je grafické zpracování velmi důležité, protože mnohé pojmy jsou vzhledem k představitelnosti žáků příliš abstraktní a názorné zpracování pomáhá lépe učivo pochopit a zapamatovat si jej. Správný učební text by měl dávat podněty k přemýšlení a mít přesah do ostatních oborů, popř. do praktického života. Zajímavost textu je zahrnuta do kategorie rozšíření tématu, která byla hodnocena právě podle zmíněných zajímavostí. Poslední hodnocenou kategorií je sebehodnocení žáků, ke kterému žákům slouží otázky či úkoly na konci probrané kapitoly. Pro ověření správnosti výsledků by v učebnici měly být přítomny i odpovědi na otázky a případná autorská řešení úkolů.^{51,52}

Jednotlivá kritéria budou hodnocena podle Tabulka 2:

Tabulka 2: Vzorová tabulka s vybranými kritérii a bodovým ohodnocením pro hodnocení učebnic.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|---------------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 5 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 5 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 5 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 5 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 5 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 5 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 5 |
| Celkový počet bodů | | 50 |

Pro obsahovou analýzu učiva o koordinačních sloučeninách byly zvoleny tyto středoškolské učebnice:

- Honza J., Mareček A., *Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl*, nakl. Olomouc, Olomouc, **1998**.⁵³
- Vacík J., *Přehled středoškolské chemie*, nakl. SPN – pedagogické nakladatelství, Praha, **1995**.⁵⁴
- Flemr V., Dušek B., *Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická*, nakl. SPN – pedagogické nakladatelství, Praha, **2001**.⁵⁵
- Benešová M., Satrapová H., *Odmaturuj! z chemie*, nakl. Didaktis, Brno, **2002**.⁵⁶
- Růžičková K., Kotlík B., *Chemie v kostce pro střední školy*, nakl. Fragment, Praha, **2013**.⁵⁷
- Gärtner H., Hoffmann M., Schaschke H., Schürmannová M., *Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník*, 2. vydání, nakl. Universum, Praha, **2013**.⁵⁸
- Obrátil V., Sáblík L., *Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.*, nakl. ProSpolužáky.cz, Hradec Králové, **2018**.⁵⁹

2.4.1 Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl

Tabulka 3: Bodové hodnocení učebnice *Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 5 |
| | Odborná správnost | 4 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 4 |
| | Čtivost | 4 |
| Struktura | Přehlednost | 5 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 5 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 1 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 3 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 2 |
| | Celkový počet bodů | 38 |

Učebnice *Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl* věnuje problematice koordinačních sloučenin samostatnou kapitolu s názvem „Komplexní sloučeniny“, ve které jsou vysvětleny základní pojmy koordinační chemie jako centrální atom, ligand, koordinační číslo apod., v závěrečné části učebnice je věnován prostor k vysvětlení pravidel názvosloví koordinačních sloučenin.⁵³ Po obsahové stránce text svým rozsahem překračuje rámeček středoškolského učiva chemie, od čehož se odvíjí i zjednodušení některých jeho částí a místy i větší obtížnost. Celkově je text psán srozumitelně, doprovází jej spousta obrázků pro snazší představu, je čtivý a s logickou návazností. Pro snazší orientaci a větší přehlednost je na vnějších okrajích stránek vyčleněn volný prostor, ve kterém jsou zmíněny důležité pojmy z dané stránky. Co se týká otázek a úkolů k závěrečnému sebehodnocení žáků, v části věnované názvosloví nalezneme několik cvičných příkladů a na konci učebnice se nachází i správná řešení.

2.4.2 Přehled středoškolské chemie

Tabulka 4: Bodové hodnocení učebnice *Přehled středoškolské chemie*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 4 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 4 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 4 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 3 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 0 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 0 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 0 |
| | Celkový počet bodů | 30 |

Tato učebnice představuje ucelený přehled středoškolské chemie, který je u učitelů poměrně oblíbený pro svou vysokou kvalitu informací často sahajících nad rámec učiva.⁵⁴ Koordinační sloučeniny jsou však v knize zmíněny spíše okrajově a koordinačně-kovalentní vazba je zahrnuta pod kapitolu pojednávající obecně o vzniku a vlastnostech chemické vazby. Pro žáka střední školy je úroveň rozsahu a odborné správnosti dostačující, text je psán čtivě a v logické návaznosti. Množství obrázků nebo jiného grafického zpracování je zde však nedostačující.

2.4.3 Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická

Tabulka 5: Bodové hodnocení učebnice *Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 5 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 5 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 5 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 3 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 5 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 4 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 5 |
| | Celkový počet bodů | 47 |

V učebnici *Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická* je problematika koordinačních sloučenin zpracována v samostatné kapitole „Koordinační sloučeniny“, která je podle mého názoru zpracována v poměrně obsáhlém rozsahu a překračuje rámec požadavků na žáka střední školy.⁵⁵ Obsahově je kapitola zpracovaná velice výstižně a přehledně, odborně správně a text je dobře čitelný, přičemž jednotlivé úseky na sebe logicky navazují. Podstatné pojmy jsou v textu zvýrazněny tučně, což jen utvrzuje přehlednost textu. Kapitulu doplňují i zajímavosti, které jsou uvedeny menší velikostí písma a slouží zároveň jako nástavba základního učiva. Za nedostatek považují malé množství obrázků, popř. schémat, která mohla téma žákům více přiblížit.

2.4.4 Odmaturuj! z chemie

Tabulka 6: Bodové hodnocení učebnice *Odmaturuj! z chemie*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 3 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 4 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 5 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 5 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 0 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 0 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 0 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 0 |
| | Celkový počet bodů | 27 |

Učebnice *Odmaturuj! z chemie* je psána formou shrnutí nejpodstatnějších informací o daném tématu, často v bodových odrážkách.⁵⁶ Co do rozsahu zahrnuje kapitola popisující koordinační sloučeniny strohé informace, které jsou ovšem psány odborně správně a v logické návaznosti. Teorie pojednávající o koordinačně-kovalentní vazbě je začleněna do kapitoly popisující chemickou vazbu. Učebnice je zpracována velmi přehledně, kdy na vnějších okrajích stránek nalezneme místo pro doplňující informace nebo zdůraznění některého z pojmů. Obrázky, tabulky či grafy k tématu koordinační vazba zcela chybí a nenalezneme zde ani otázky či úkoly k závěrečné sebereflexi žáků.

2.4.5 Chemie v kostce pro střední školy

Tabulka 7: Bodové hodnocení učebnice *Chemie v kostce pro střední školy*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 3 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 2 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 4 |
| | Čtivost | 4 |
| Struktura | Přehlednost | 3 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 0 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 0 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 0 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 0 |
| | Celkový počet bodů | 21 |

Chemie v kostce představuje stručný přehled středoškolské chemie, který je psán velmi stručně nebo v bodech, což ve výsledku ubírá na jeho srozumitelnosti.⁵⁷ Z hlediska obsahu je problematika komplexů v učebnici dostačující, ale není jí vyčleněna samostatná kapitola. Elementární pojmy jako „centrální atom“ či „ligand“ stručně vysvětluje kapitola věnující se komplexotvorným rovnováhám. Po grafické stránce je téma bez jakýchkoli obrázků a zároveň jsou zcela vynechány otázky a úkoly pro žáky.

2.4.6 Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník

Tabulka 8: Bodové hodnocení učebnice *Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník*.

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|--------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 5 |
| | Odborná správnost | 5 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 5 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 4 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 5 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 4 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 0 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 0 |
| | Celkový počet bodů | 38 |

Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník není obvyklou učebnicí středních škol, protože chemické učivo komplexně shrnuje.⁵⁸ Do analýzy byla zařazena pro porovnání s ostatními učebnicemi, které učivo též shrnují a žáci je v chemii využívají jako učebnici. Tématu koordinačních sloučenin je v učebnici věnována samostatná kapitola, která svým rozsahem překračuje požadavky na žáka střední školy. Problematika je vysvětlována odborně správně, text je psán čtivě a v logické návaznosti. Strukturní zpracování je přehledné, ale chybí zvýraznění podstatných pojmů. Konec kapitoly rozšiřuje tematiku o biologický význam komplexů, který žáky jistě zaujme. Zcela zde chybí otázky a úkoly k závěrečnému opakování, které by žákům umožnilo sebereflexi.

2.4.7 Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.

Tabulka 9: Bodové hodnocení učebnice *Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.*

| Kategorie | Hodnocená kritéria | Počet bodů |
|---------------------------|----------------------------|------------|
| Obsah | Rozsah | 4 |
| | Odborná správnost | 4 |
| | Logická návaznost | 5 |
| Srozumitelnost | Obtížnost textu | 5 |
| | Čtivost | 5 |
| Struktura | Přehlednost | 5 |
| Grafická stránka | Obrázky, tabulky, grafy | 4 |
| Rozšíření tématu | Zajímavosti | 2 |
| Sebehodnocení žáků | Otázky a úkoly | 5 |
| | Odpovědi a autorská řešení | 5 |
| Celkový počet bodů | | 43 |

V učebnici *Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.* nalezneme poznatky týkající se koordinačních sloučenin v kapitole s názvem „Koordinačně-kovalentní vazba“.⁵⁹ Obsahově zahrnuje kapitola základní pojmy, tudíž je zde rezerva co do rozsahu. Po odborné stránce je co vytknout, nicméně vzhledem k celkovému konceptu učebnice, která se žákům snaží zprostředkovat učivo chemie co nejvíce přijatelnou formou, můžeme odbornost textu považovat za adekvátní. Celkově je text psán čtivě, v logické návaznosti a jeho obtížnost je pro žáky středních škol vyhovující. Učebnice se vyjímá svojí velmi přehlednou strukturou a dle mého názoru je pro čtenáře v tomto ohledu velmi atraktivní. Na konci kapitoly nalezneme i krátké shrnutí důležitých pojmů a následně krátké procvičení získaných znalostí včetně autorského řešení. Pro další upevnění znalostí může učitel nebo žák využít pracovní sešit s úkoly na procvičení.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Seznam chemikálií

V experimentální části diplomové práce byly použity komerční chemikálie, které byly použity bez další úpravy. Seznam použitých chemikálií je uveden v Tabulka 10.

Tabulka 10: Seznam použitých chemikálií

| Název | Čistota | Výrobce |
|---|---------|--------------------------|
| NaNO ₂ | p. a. | Lach-ner, s.r.o. |
| Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | p. a. | Lachema |
| NH ₄ Cl | p. a. | Lach-ner s.r.o. |
| CoCl ₂ ·6H ₂ O | p. a. | VWR Chemicals |
| CH ₃ COOH | p. a. | Penta |
| CH ₃ CH ₂ OH | p. a. | Penta |
| HCl | p. a. | VWR Chemicals |
| aktivní uhlí | p. a. | Penta |
| H ₂ O ₂ | p. a. | Lachner s.r.o. |
| NaHCO ₃ | p. a. | Sigma-Aldrich |
| diethylether | p. a. | VWR Chemicals |
| absolutní ethanol | p. a. | VWR Chemicals |
| acetylaceton | p. a. | Penta |
| CrCl ₃ ·6H ₂ O | p. a. | Lach-ner s.r.o. |
| močovina | p. a. | Lachema |
| KSCN | p. a. | Lachema |
| KCr(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O | p. a. | Penta |
| K ₂ Cr ₂ O ₇ | p. a. | Lachema |
| C ₂ H ₂ O ₄ ·2H ₂ O | p. a. | Penta |
| K ₂ C ₂ O ₄ ·H ₂ O | p. a. | Lachema |
| FeSO ₄ ·7H ₂ O | p. a. | Lachema |
| CoSO ₄ ·7H ₂ O | p. a. | Lachner s.r.o. |
| NiSO ₄ ·7H ₂ O | p. a. | Lachema |
| NH ₃ | p. a. | Sigma-Aldrich |
| KCN | p. a. | Lachner s.r.o. |
| ethylendiamin dihydrochlorid | p. a. | Sigma-Aldrich |
| KHCO ₃ | p. a. | Mach chemikálie s. r. o. |
| glycin | p. a. | Sigma-Aldrich |

3.2 Příprava koordinačních sloučenin

V experimentální části byly syntetizovány předem zvolené koordinační sloučeniny chromu a kobaltu v oxidačním stavu +III a s koordinačním číslem 6. Vybrané ligandy by měly vhodně prezentovat vliv ligandu na štěpení d-orbitalu centrálního atomu kovu v závislosti na jejich poloze ve spektrochemické řadě ligandů. Další zvolenou řadou byla série oktaedrických pentaamminkobaltitých kationtů $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Y}]^{3+}$, kde se stal proměnlivým šestý ligand (Y).

3.2.1 Trihydrát chloridu hexaureachromitého $[\text{Cr}(\text{ur})_6]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁰ Směs chloridu chromitého (16,2 g; 60,8 mmol) a močoviny (21,6 g; 0,359 mol) byla rozpuštěna v 60 ml destilované vody a k roztoku bylo přidáno 5 kapek koncentrované kyseliny chlorovodíkové pro úpravu pH. Roztok byl následně bez míchání zahříván do chvíle, kdy se na povrchu vytvořila krystalizační blána. V tomto kroku byl roztok ponechán volně stát přes noc. Vzniklá tmavě zelená suspenze byla přefiltrována. Produkt byl následně rozpuštěn v minimálním množství destilované vody ohřáté na 50–60 °C a ponechán volně krystalizovat. Vzniklý krystalický produkt tmavě zelené barvy byl odsát na fritě a následně rekrystalizován z vodného roztoku.

Výtěžek: 5,33 g (18,8 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

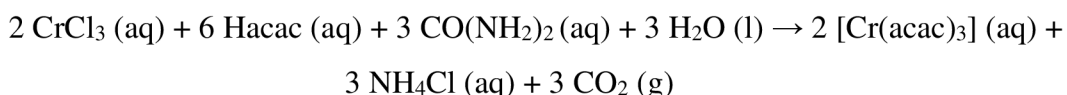


3.2.2 Tris(acetylaceto)chromitý komplex $[\text{Cr}(\text{acac})_3]$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶¹ Do kádinky byl připraven roztok hexahydrátu chloridu chromitého (4,0 g; 15,0 mmol) v 64 ml destilované vody. Do tohoto roztoku byla následně přidána močovina (16,0 g; 0,266 mol) a acetylaceton (Hacac; 12,8 ml; 12,5 g; 125 mmol). Reakční směs byla za stálého míchání zahřívána cca 1 hodinu pod zpětným chladičem a po hodině zahřívání byla ponechána v digestoři k samovolnému vychladnutí. Vzniklý tmavě fialový produkt byl odsán a ponechán na hodinovém skle k vysušení.

Výtěžek: 3,06 g (58,4 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

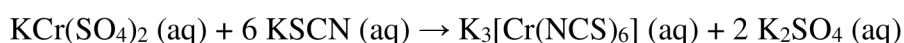


3.2.3 Tetrahydrát hexaisothiokyanatochromitanu draselného $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{NCS})_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶² Nasycený roztok thiokyanatanu draselného (39 g; 0,4 mol) a nasycený roztok dodekahydrátu síranu draselno-chromitého (20 g; 0,04 mol) byly smíchány. Získaný roztok byl nalit do porcelánové misky, ve které byl na vodní lázni odpařen do sucha. Vyloučená látka byla přelita 100 ml ethanolu, promíchána skleněnou tyčinkou a následně odsána. Filtrát byl ponechán volně krystalizovat po dobu 7 dní. Produktem byla fialová látka.

Výtěžek: 9,33 g (39,9 %)

Reakce probíhala podle rovnice:



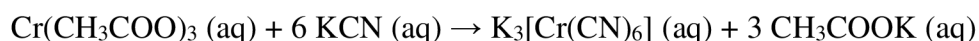
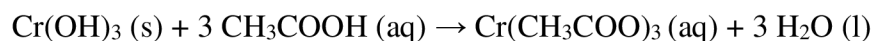
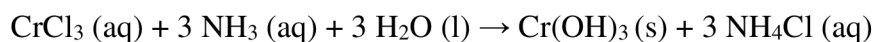
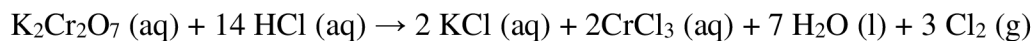
3.2.4 Hexakyanidochromitan draselný $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{CN})_6]$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.^{60,63} Do kádinky o objemu 400 ml byl připraven roztok dichromanu draselného (12,5 g; 42,5 mol) ve 35 ml zředěné kyseliny chlorovodíkové, která byla připravena smícháním 12,5 ml destilované vody a 22,5 ml kyseliny chlorovodíkové ($w = 36 \%$). Směs byla zahřívána za stálého míchání na magnetické míchačce, dokud se všechno dichroman draselný nerozpustil. K horkému roztoku bylo postupně přidáno 12,5 ml ethanolu a následně byl roztok zahřát k varu. Do vroucího roztoku byl přidáván koncentrovaný roztok amoniaku ($w = 25\%$), dokud docházelo ke srážení šedomodré sraženiny, kterou bylo následně třeba třikrát dekantovat v destilované vodě. Sraženina byla poté přefiltrována, převedena do 400ml kádinky a rozpuštěna ve 200 ml zředěné kyseliny octové (1:1). Vzniklý tmavě zelený roztok byl odpařen do sucha a pevná látka na dnu kádinky opětovně rozpuštěna v 75 ml destilované vody. Vzniklý roztok byl přefiltrován a za stálého míchání postupně přidáván ke vroucímu roztoku kyanidu draselného (50 g; 0,768 mol) ve 100 ml destilované vody. Při dalším zahřívání roztoku se z něj vyloučila sraženina, která byla odsáta na Büchnerově nálevce za sníženého tlaku. Vzhledem k velkému znečištění bylo potřeba produkt třikrát

rekrytalizovat z horké vody, vyloučené světla žluté krystaly byly odsáty a na filtru promyty ethanolem. Filtrát byl ponechán k samovolné krystalizaci.

Výtěžek: 6,86 g (16,46 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

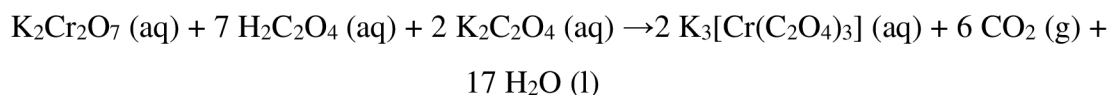


3.2.5 Trihydrát tris(oxalato)chromitanu draselného $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{ox})_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁰ Nejprve byly připraveny nasycené roztoky dichromanu draselného (12 g; 40,8 mmol), dihydrátu kyseliny šťavelové (27 g; 214,1 mmol) a monohydrátu šťavelanu draselného (12 g; 65,1 mmol). Ve 1000ml kádince byly smíchány roztoky kyseliny šťavelové a šťavelanu draselného. Následně byl do reakční směsi přidáván za stálého míchání roztok dichromanu draselného. Takto připravený roztok byl poté postupně za stálého míchání mírně zahříván a jeho objem zredukován na objem přibližně 150 ml. Po ochlazení na laboratorní teplotu byl přidán ethanol do vzniku trvalého zákalu a poté byl roztok vychlazen v ledové lázni. Výsledný produkt byl odsán na Büchnerově nálevce za sníženého tlaku a vysušen na vzduchu přes noc. Produktem byla tmavě zelenočerná krystalická látka.

Výtěžek: 27,49 g (69,15 %)

Reakce probíhala podle rovnice:



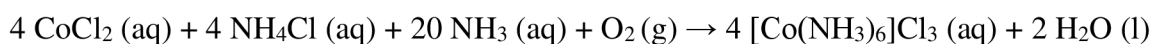
3.2.6 Chlorid hexaaminkobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ Směs hexahydrátu chloridu kobaltnatého (20 g; 75 mmol) a chloridu amonného (13,5 g; 252 mmol) byla rozpuštěna ve 30 ml destilované vody. Pro dokonalé rozpuštění bylo potřeba směs za stálého míchání mírně zahřát. Do tmavě fialového roztoku bylo následně přidáno 5 g aktivního uhlí a 40 ml roztoku amoniaku ($w = 30\%$; 0,63 mol). Směs byla přelita do baňky s kulatým dnem, která

byla uzavřena dvakrát vrtanou zátkou se dvěma skleněnými trubičkami, připojena na centrální vakuum a probublávána vzduchem 2 hodiny. Vzniklá směs byla odsána na Büchnerově nálevce, produkt s aktivním uhlím následně rozpuštěn v horké destilované vodě okyselené dvěma kapkami kyseliny chlorovodíkové ($w = 36 \%$) a za horka přefiltrován. Získaný oranžový roztok byl ochlazen v ledové lázni na $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně do něj byla přidána koncentrovaná kyselina chlorovodíková ($w = 36 \%$; 200 ml; 2,33 mol. Vysrážený produkt byl odsán, promyt ethanolem na filtru a volně vysušen na vzduchu přes noc. Produktem byla oranžová látka.

Výtěžek: 3,50 g (62,3 %)

Reakce probíhala dle rovnice:

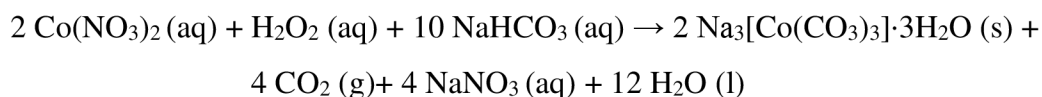


3.2.7 Trihydrát tris(karbonato)kobaltitanu sodného $\text{Na}_3[\text{Co}(\text{CO}_3)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁵ Nejprve byl připraven roztok hexahydrátu dusičnanu kobaltnatého (9,7 g; 33 mmol) v 16,7 ml destilované vody, který se za stálého míchání na magnetické míchačce a chlazení v ledu po kapkách přidával do husté suspenze hydrogenuhličitanu sodného (14 g; 0,17 mol) a 50 ml destilované vody. Dále byl do směsi po kapkách přidán roztok peroxidu vodíku ($w = 30 \%$; 4,3 ml; 42 mmol). Vzniklá tmavě zelená suspenze byla následně 1 hodinu míchána za stálého chlazení na ledové lázni. Poté byla suspenze odsáta na Büchnerově nálevce, promyta na filtru 30 ml studené destilované vody, 15 ml absolutního ethanolu, 15 ml diethyletheru a sušena volně na vzduchu do druhého dne. Produktem byla látka tmavě olivové barvy.

Výtěžek: 6,33 g (52,49 %)

Reakce probíhala podle reakce:



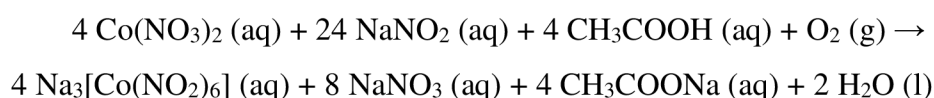
3.2.8 Hexanitrokobaltitan sodný $\text{Na}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ V kádince o objemu 150 ml byl rozpuštěn dusitan sodný (30 g; 0,43 mol) v 30 ml horké destilované vody. Roztok byl ochlazen na $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a byl do něj přidán hexahydrát dusičnanu kobaltnatého (9,9 g; 34 mmol), který se v roztoku rozpustil po mírném zahřátí. Následně byla po kapkách

přidána kyselina octová ($w = 98 \%$; 5,1 ml; 88 mmol). Takto připravená reakční směs byla přelita do baňky s kulatým dnem, uzavřena dvakrát vrtanou zátkou se dvěma skleněnými trubičkami, připojena na centrální vakuum a cca 90 min probublávána vzduchem. Získaný roztok byl zfiltrován a k filtrátu bylo přidáno 60 ml ethanolu. Světle oranžový produkt byl odsán na Büchnerově nálevce, promyt ethanolem a vysušen volně na vzduchu.

Výtěžek: 8,37 g (20,1 %)

Reakce probíhala podle reakce:

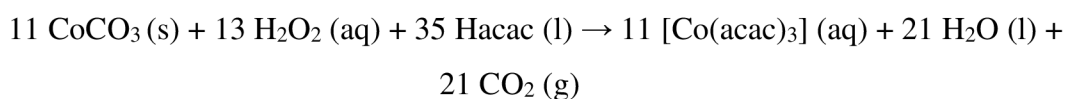


3.2.9 Tris(acetylaceto)kobaltitý komplex $[\text{Co}(\text{acac})_3]$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁶ Směs uhličitanu kobaltnatého (2,5 g; 21 mmol) a acetylacetonu (Hacac; 20 ml; 195 mmol) byla za stálého míchání zahřáta na vodní lázni na přibližně 85 °C. Po kapkách byl ke směsi přidáván peroxid vodíku ($w = 10 \%$; 30 ml; 91 mmol), přičemž reakční směs šuměla a zezelenala. Jakmile šumění ustalo, byla reakční směs ochlazená ve směsi ledu a chloridu sodného a následně byla odfiltrována. Sraženina na filtru byla promyta studeným ethanolem a poté vysušena v peci při 110 °C po dobu 15 minut. Surový produkt byl rekrystalizován v horkém methanolu. Produktem byla tmavě černozeleňá látka.

Výtěžek: 5,3 g (70,7 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

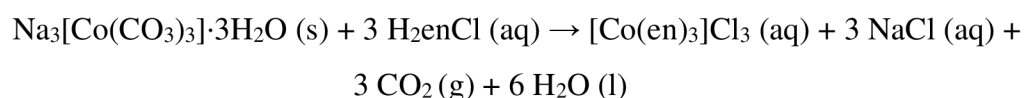


3.2.10 Chlorid tris(ethylendiammin)kobaltitý $[\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁵ K suspenzi trihydrátu tris(karbonato)kobaltitanu sodného (3,6 g; 9,9 mmol) ve vodě byl přidán ethylendiamin dihydrochlorid (H_2enCl ; 4,0 g; 15 mmol) a celá směs byla následně zahřívána na vodní lázni po dobu 30 minut. K reakční směsi bylo poté přidáno minimální množství ethanolu, aby bylo podpořeno vysrážení produktu z roztoku. Vzniklý oranžový produkt byl rekrystalizován ze směsi ethanol-voda (1:1).

Výtěžek: 3,38 g (85,14 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

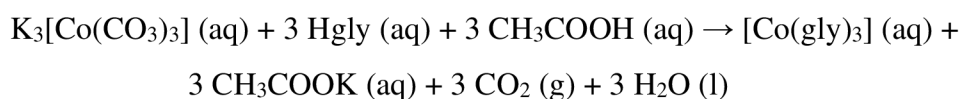
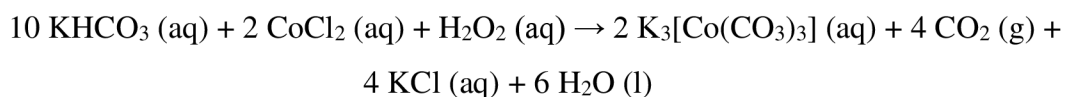


3.2.11 Tris(glycinato)kobaltitý komplex $[\text{Co}(\text{gly})_3]$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁷ Suspenze hydrogenuhličitanu draselného (30 g; 0,30 mol) v 30 ml destilované vody byla ochlazena v ledové lázni. Následně byl přidán roztok hexahydrátu chloridu kobaltnatého (10 g; 0,042 mol) ve 12 ml destilované vody a reakční směs se nechala stát v ledové lázni 15 minut. Ke směsi byl poté za stálého míchání po kapkách přidáván peroxid vodíku ($w = 30 \%$; 15 ml; 4,01 g; 0,240 mol). Teplota reakční směsi byla udržována v rozmezí 0–5 °C. Vzniklá tmavě zelená směs byla filtrována. K filtrátu byl přidán glycin (Hgly; 9,0 g; 0,12 mol) a směs byla poté zahřívána na teplotu 60–70 °C, dokud neproběhla barevná změna z tmavě zelené na tmavě fialovou. Za intenzivního míchání byla k roztoku po kapkách přidávána kyselina octová ($c = 6 \text{ mol/l}$), přičemž docházelo k šumění směsi (uvolňování oxid uhličitého). Jakmile šumění přestalo, došlo ke změně zbarvení roztoku na červenofialovou a reakce byla ukončena. Po ochlazení reakční směsi byl fialovo červený produkt oddělen filtrací a vysušen volně na vzduchu.

Výtěžek: 2,54 g (21,51 %)

Reakce probíhala podle rovnice:



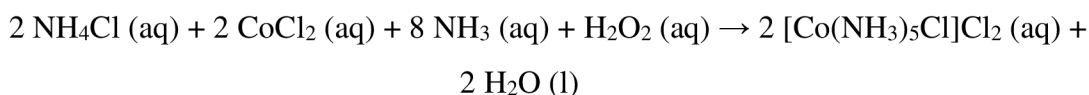
3.2.12 Chlorid pentaaminchloridokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ Ve 400 ml Erlenmayerově baňce byl připraven roztok chloridu amonného (15 g; 0,28 mol) v koncentrovaném vodného roztoku amoniaku ($w = 30\%$; 90 ml; 1,41 mol). Za stálého míchání byl do roztoku postupně přidán hexahydrát chloridu kobaltnatého (30 g; 0,13 mol) a následně po kapkách roztok peroxidu vodíku (24 ml; $w = 30\%$; 0,23 mol). Při přidávání peroxidu vodíku reakční směs pěnila, a proto bylo třeba jej pomalu přikapávat. Nakonec byla přidána

koncentrovaná kyselina chlorovodíková (90 ml; $w = 36 \%$; 1,1 mol) a celá směs byla zahřáta na $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Po celou dobu byla reakční směs míchána na magnetické míchačce. Poté byl roztok ochlazen na laboratorní teplotu, vyloučený produkt odsán a promyt minimálním množstvím ledové destilované vody. Produktem byl světle fialový prášek.

Výtěžek: 30,2 g (95,65 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

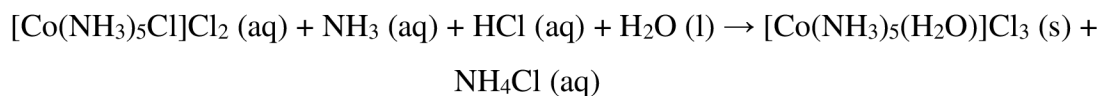


3.2.13 Chlorid pentaamminaquakobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_3$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ V baňce s kulatým dnem byl rozpuštěn chlorid pentaamminchloridokobaltitý (3,36 g; 13,4 mmol; příprava viz 3.2.12) ve vodném roztoku amoniaku ($w = 5 \%$; 50,4 ml; 0,14 mol). Za stálého míchání byla reakční směs zahřívána pod zpětným chladičem, dokud se látka nerozpustila za vzniku tmavě červeného roztoku. Ten byl následně ochlazen v ledové lázni na cca $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Poté byla do roztoku po kapkách přidávána koncentrovaná kyselina chlorovodíková ($w = 36 \%$), jejíž přidávání bylo zastaveno ve chvíli, kdy nad roztokem nevznikal bílý dým. Vysrážený červený produkt byl odsán, promyt ethanolem a volně vysušen na vzduchu do druhého dne.

Výtěžek: 1,14 g (31,67 %)

Reakce probíhala podle rovnice:



3.2.14 Chlorid pentaamminnitritokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{ONO})]\text{Cl}_2$

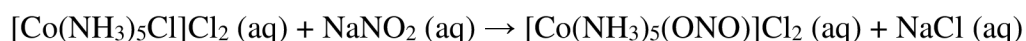
Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ Ve 150ml kádince byla připravena směs chloridu pentaamminchloridokobaltitého (2,5 g; 1 mmol) se 40 ml roztoku amoniaku ($w = 10\%$; 0,23 mol). Za stálého míchání byla reakční směs mírně zahřívána do doby, než se $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ zcela nerozpustil. Vzniklý roztok byl ochlazen v ledu na $10 \text{ }^\circ\text{C}$. K vychlazenému roztoku byla po kapkách přidávána kyselina chlorovodíková o $c = 2 \text{ mol/l}$ až do neutrálního pH (pH bylo kontrolováno pH papírkem). Následně byl do reakční směsi přidán dusitan sodný (2,5 g; 36 mmol) a 2,5 ml roztoku kyseliny

chlorovodíkové

($c = 6 \text{ mol/l}$; 15 mmol). Následně byla směs ponechána 30 minut v ledové lázni. Vyloučený produkt byl odsán na fritě, promyt 15 ml ethanolu a vysušen volně na vzduchu. Produktem byla oranžovožlutá látka.

Výtěžek: 2,35 g (90,26 %)

Reakce probíhala podle rovnice:

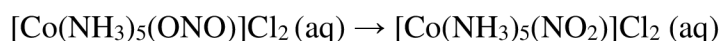


3.2.15 Chlorid pentaamminitrokobaltitý $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}_2$

Komplex byl připraven podle postupu z literatury.⁶⁴ Směs 20 ml destilované vody s pár kapkami koncentrovaného amoniaku ($w = 30 \%$) byla zahřívána k varu. Poté byl do roztoku přidán chlorid pentaamminitritokobaltitý (2 g; 6,7 mmol) a zároveň bylo zastaveno zahřívání reakční směsi. Kádinka s reakční směsí byla ponechána k samovolnému zchladnutí, během kterého bylo do směsi přikapáváno 20 ml koncentrované kyseliny chlorovodíkové ($w = 36 \%$; 0,23 mol). Po vychlazení reakční směsi na laboratorní teplotu z ní byl produkt oddělen odsátím na fritě. Produkt byl následně promyt ethanolem a volně sušen na vzduchu.

Výtěžek: 1,689 g (84,45 %)

Reakce probíhala podle rovnice:



3.3 Použité metody a přístroje

Elektronová spektra připravených komplexů byla změřena na UV/VIS spektrometru Cintra 3030 od firmy GBS. K měření roztoků vzorků byly použity plastové kyvety o šířce 1 cm a měřilo se v rozsahu vlnových délek 300–900 nm.

Vzhledem k různé rozpustnosti studovaných komplexů bylo pro přípravu roztoků použito několik rozpouštědel (destilovaná voda, vodný roztok amoniaku a methanol). Destilovaná voda byla jako rozpouštědlo zvolena konkrétně u komplexů $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{CN})_6]$, $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{NCS})_6] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $[\text{Cr}(\text{urea})_6]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{ox})_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]$, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$, $[\text{Co}(\text{en})_3]\text{Cl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $[\text{Co}(\text{gly})_3]$, $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Mn}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a $\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. U vzorku $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ bylo pH připraveného roztoku upraveno přidávkem kyseliny sírové, aby se předešlo hydrolyze a následné oxidaci iontů

Fe(II). Komplexy $[\text{Cr}(\text{acac})_3]$ a $[\text{Co}(\text{acac})_3]$ byly rozpuštěny v methanolu. Série koordinačních sloučenin typu $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{X}]^z$ byla rozpuštěna ve vodném roztoku amoniaku (1:1). Konkrétně se jednalo o komplexy $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_3$, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{ONO})]\text{Cl}_2$ a $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}_2$.

Infračervená spektra byla měřena na FT-IR spektrometru Jasco FT/IR-4700 metodou ATR (diamantový krystal) v rozmezí $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$.

Tisk plastových podstavců byl realizován pomocí tiskárny BIQU B1, s použitím filamenta Sunlu PLA o tloušťce 1,75 mm. Návrh podstavců byl vytvořen v programu SolidWorks a jejich úprava před tiskem byla provedena v programu Cura.^{68,69}

Části dřevěných podstavců byly zhotoveny z překližky o tloušťce 4 mm a byly realizovány ve spolupráci s firmou AB model Olomouc. Návrh podstavce byl vytvořen ve vektorovém grafickém editoru Inkscape.⁷⁰

3.4 Didaktická pomůcka

Součástí stanovených cílů diplomové práce bylo vytvoření výukových pomůcek na téma „koordinační sloučeniny a jejich vlastnosti“, které by mohly sloužit jako vhodný doplněk při výuce o koordinačních sloučeninách. Vzhledem k úzkému rozsahu učiva, které je na středních školách této problematice věnováno, představují didaktické pomůcky demonstrující jejich vlastnosti možnost, jak žákům dané téma zprostředkovat zajímavější a přitažlivější formou a zároveň žáky při hodině aktivizovat.

Vlastností koordinačních sloučenin, která je pro žáky nejvíce poutavá a také se dá efektivně zpracovat z chemického hlediska, je jejich barevnost. Díky schopnosti absorbovat viditelné záření v rozsahu vlnových délek přibližně 380–700 nm se nám látka jeví barevně. Obecně platí, že jestliže látka pohltí záření v daném rozsahu vlnových délek, např. pro červenou barvu (absorpční maximum v UV/VIS spektru okolo 700 nm), bude výsledná barva látky odpovídat tzv. barvě doplňkové neboli komplementární (Tabulka 11). V případě červené barvy se jedná o barvu zelenou. Barevnost komplexních sloučenin vychází z rozštěpení d-orbitalu centrálního atomu v důsledku působení pole ligandů, kdy vlnová délka (barva) pohlceného (absorbovaného) světla odráží sílu ligandového pole – s rostoucí silou roste energetický rozdíl mezi e_g a t_{2g} hladinou a klesá vlnová délka pohlceného záření.⁷¹

Tabulka 11: Rozsahy vlnových délek absorbovaných a doplňkových barev ve viditelné části spektra elektromagnetického záření.⁶

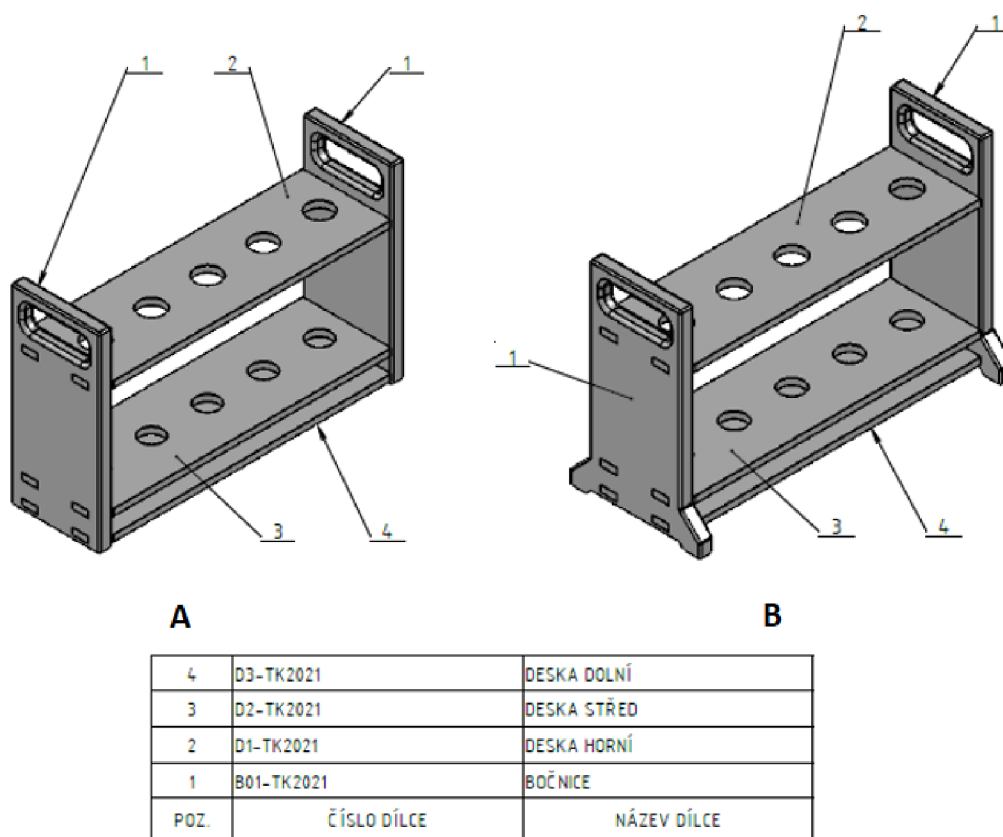
| Vlnová délka (nm) | Absorbovaná barva světla | Doplňková barva |
|-------------------|--------------------------|-----------------|
| 380–430 | fialová | žlutá |
| 430–490 | modrá | oranžová |
| 490–560 | zelená | červená |
| 560–580 | žlutá | fialová |
| 580–620 | oranžová | modrá |
| 620–700 | červená | zelená |

Z výše zmíněných skutečností se stalo záměrem vytvoření takových pomůcek, které by poukazovaly na vliv ligandů na rozštěpení d-orbitalu centrálního kovu, a tedy i rozdílnou barevnost komplexu, popř. to, jak se projeví substituce jednoho ligandu v koordinační sféře komplexu, tj. zda bude rozpoznatelná barevná odchylka související se změnou v energetickém štěpení d-orbitalů CA.

3.4.1 Série komplexních sloučenin

V rámci experimentální části byly syntetizovány vybrané koordinační sloučeniny chromu a kobaltu v oxidačním stavu +III a s koordinačním číslem 6. Dílčím cílem bylo vytvoření takové série komplexů, jejichž ligandy budou prezentovat rozdílné štěpení d-orbitalu centrálního atomu, a v důsledku toho bude viditelná barevná odlišnost mezi jednotlivými vzorky v sérii.

Jednotlivé série tvoří vždy pět vybraných komplexů, které jsou seřazeny podle rostoucí síly ligandového pole. Připravené komplexní sloučeniny byly přeneseny do plastových zkumavek na biologický materiál (10 ml), které je možno zakoupit běžně v lékárně. K vytvoření didaktické pomůcky byly dále navrženy stojany na zkumavky, do nichž byly jednotlivé vzorky umístěny. Jeden typ stojanu byl vytvořen ze dřeva, přičemž jeho části byly navrženy a vyřezány pomocí laserové řezačky z překližky s tloušťkou 4 mm. Druhý typ stojanu byl navržen pro možnost 3D tisku ve dvou variantách (Obr. 39). Technické parametry a podklady s daty pro 3D tisk stojanu jsou společně s návrhem dřevěného stojanu součástí elektronických příloh diplomové práce.

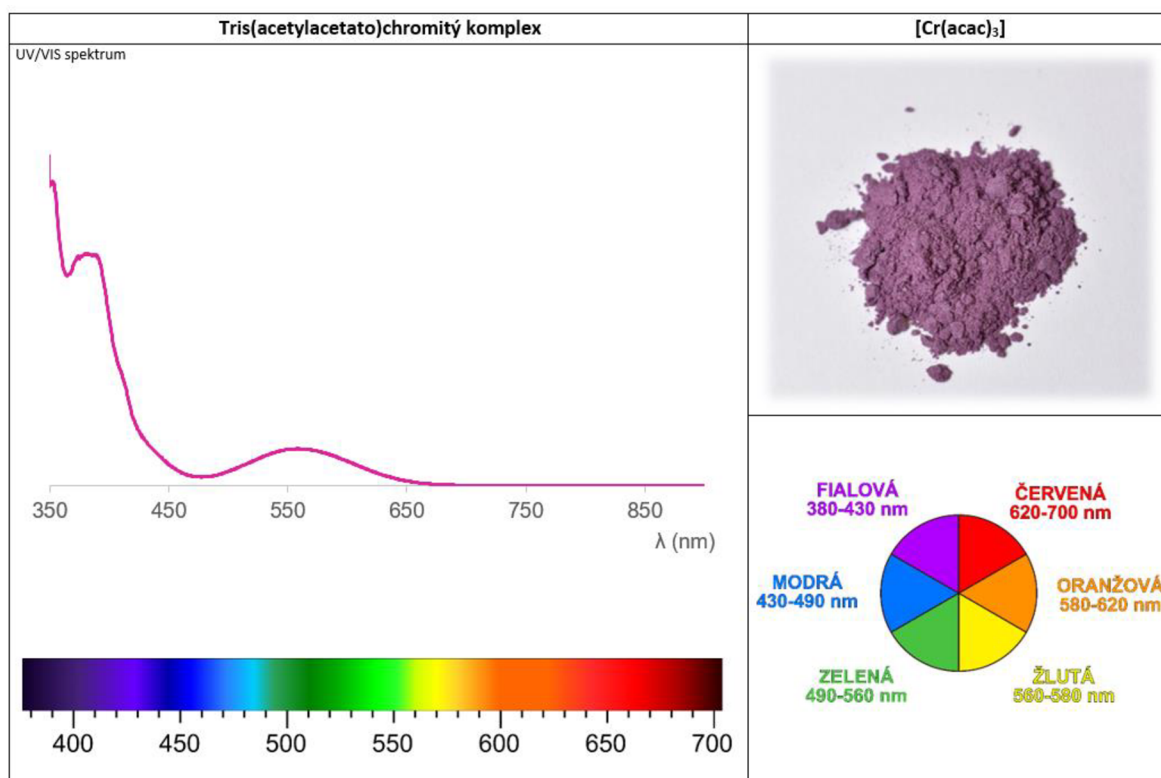


Obr. 39: Technický návrh stojanu pro 3D tisk (A = varianta 1, B = varianta 2).

Vzhledem k tomu, že zbarvení komplexů je ovlivněno také typem centrálního atomu a jeho oxidačním stavem, byla vytvořena čtvrtá série komplexů. V této sérii byly využity komerčně dostupné soli přechodných kovů ze 4. periody periodické soustavy prvků (PSP), které obsahují oktaedrické kationty typu $[M(H_2O)_6]^z$, kde M představuje atom přechodného kovu.

3.4.2 Karty s UV/VIS spektry

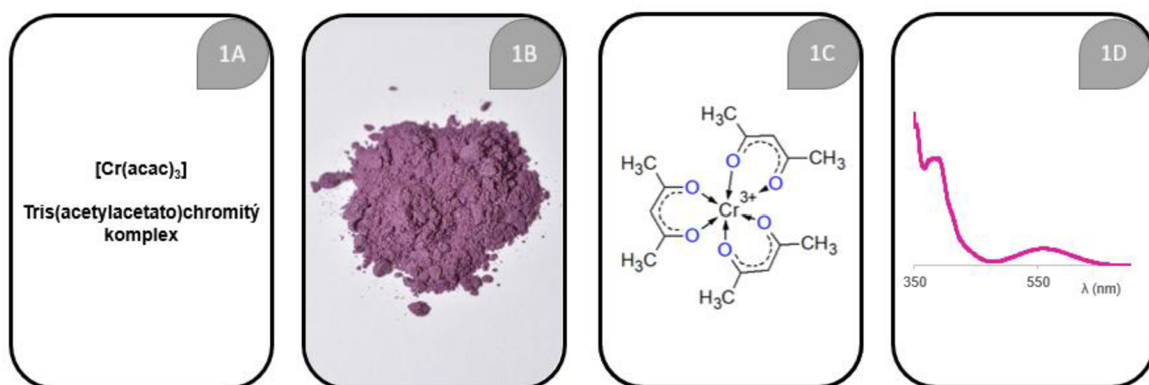
Druhou zvolenou didaktickou pomůckou byla sada karet obsahujících UV/VIS spektra připravených komplexních sloučenin (Obr. 40). Záhlaví karty je tvořeno názvem koordinační sloučeniny a jejím chemickým vzorcem. V levé části se nachází konkrétní UV/VIS spektrum s vyznačeným absorpčním maximem a pod spektrem je umístěna barevná škála, která zahrnuje barevné přechody a vlnové délky. Pravá část karty obsahuje fotku koordinační sloučeniny pro jasnou demonstraci barevného vzhledu sloučeniny a pod ní se nachází barevný kruh, který znázorňuje komplementární barvy a rozsahy vlnových délek pro každou barvu. Všechny karty v ucelené formě jsou součástí elektronických příloh diplomové práce.



Obr. 40: Karta s UV/VIS spektrem.

3.4.3 Karetní hra – kvarteto

Z dostupných informací a získaných materiálů (vzorec s názvem, foto sloučeniny, strukturální vzorec, UV/VIS spektrum) byla vytvořena didaktická pomůcka ve formě karetní hry – kvarteta. Z připravených sloučenin bylo náhodně vybráno osm, ke kterým byla vytvořena vždy čtveřice karet – karta s funkčním vzorcem a názvem sloučeniny, karta s fotkou reálné sloučeniny, karta se strukturálním vzorcem a zvýrazněnými donorovými atomy ligandů a karta s UV/VIS spektrem komplexu (Obr. 41). Soubor s karetním kvartetem koordinačních sloučenin je součástí elektronických příloh.



Obr. 41: Ukázka vytvořené čtveřice karet z kvarteta.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

V rámci předložené diplomové práce věnující se tématu koordinačních sloučenin ve výuce chemie byla zpracována rešerše týkající se vybraných teorií, které popisují koordinačně-kovalentní vazbu, a základních způsobů přípravy komplexních sloučenin. Téma koordinačních sloučenin se na středních školách probírá spíše okrajově, důkazem je porovnání pěti vybraných ŠVP z různých gymnázií České republiky. Samotný dokument ŠVP nemá přesně stanovenou formu, proto se jeho podoba mezi jednotlivými školami liší. Ve zvolených ŠVP je možné pozorovat rozdílnost ve zpracování, kdy některá z gymnázií mají vzdělávací obsah rozpracovaný nejprve do jednotlivých ročníků a následně jsou pro daný ročník shrnuty klíčové body vyučovacích předmětů, jiná gymnázia naopak zpracovávají vzdělávací obsah nejdříve do vyučovacích předmětů a poté v rámci předmětu rozdělují očekávané výstupy a učivo do konkrétních ročníků. Současně se porovnávané ŠVP liší v tom, jak podrobně specifikují očekávané výstupy a tomu odpovídající učivo. Z toho důvodu je i hůře dohledatelné, ve které části ŠVP se nachází učivo koordinačních sloučenin. Ve většině vybraných ŠVP jsou koordinační sloučeniny zařazeny do učiva o chemické vazbě a chemickém názvosloví, jen v případě Gymnázia Olomouc – Hejčín je problematika uvedena jako samostatné téma. O skutečnosti, že komplexní sloučeniny přechodných kovů spadají do pro žáky středních škol již nadstavbové úrovně, svědčí i fakt, že se problematika koordinačních sloučenin objevuje v ŠVP spíše v předmětech typu seminářů z chemie pro vyšší ročníky.

Nedílnou součástí výukového procesu jsou také učebnice, u kterých je velmi důležitá forma jejich zpracování, obsah a také vizuální koncept. Jak z porovnávání ŠVP vyplývá, koordinační sloučeniny nejsou zcela běžnou kapitolou výuky v chemii na středních školách. Z toho důvodu byla provedena také analýza středoškolských učebnic chemie, pro kterou byla předem vytvořena kritéria k hodnocení (viz Tabulka 2). Do hodnocených kritérií spadalo 6 oblastí – obsah, srozumitelnost, struktura, grafická stránka, rozšíření tématu a sebehodnocení žáků. Jedna učebnice mohla získat maximálně 50 bodů. Mezi vybranými učebnicemi nalezneme ty nejčastěji používané, a zároveň takové, které patří k nestandardním učebnicím a byly zde zařazeny právě za účelem srovnání jejich obsahu s využívanými středoškolskými učebnicemi. Předem je nutné uvést, že bodové ohodnocení bylo subjektivní záležitostí. Zahrnutí tématu koordinačních sloučenin do obsahu učebnice se u jednotlivých učebnic různí. Nejpodrobněji toto téma zpracovává učebnice *Chemie pro gymnázia I. - Obecná a anorganická*, která z hlediska obsahu, srozumitelnosti a struktury

textu zcela vyhovuje stanoveným kritériím. Kromě toho jsou v ní zmíněny i zajímavosti a nechybí ani část s otázkami. Druhou kladně hodnocenou je učebnice *Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.* patřící k novějším učebnicím, která je charakteristická svým pojetím. Problematika koordinačních sloučenin je zde zpracována v uspokojivé míře, ale na druhou stranu je učivo vysvětlováno s ohledem na věk a vyspělost žáků střední školy, což neodpovídá klasickému konceptu učebnicového textu. V *Chemii pro čtyřletá gymnázia: 2. díl* je koordinační chemii věnována v porovnání s předchozími učebnicemi větší část a téma je pro úroveň středoškolské chemie zpracováno dosti podrobně. *Přehled středoškolské chemie* není příliš obvyklá středoškolská učebnice, spíše slouží jako zdrojový materiál pro vyučující. I tak je zde ale zmiňovaná problematika zpracována okrajově a nedostatečně. Dalšími učebnicemi jsou *Odmaturuj! z chemie a Chemie v kostce pro střední školy*, jenž slouží spíše jako přehledy chemického učiva, o čemž svědčí i heslovitý nebo v bodech psaný text. Koordinační sloučeniny nenalezneme ani v jedné z nich jako samostatnou kapitolu a po obsahové stránce je zpracování tématu nedostačující. Pro potřeby výuky se tedy jedná o literaturu, která nevyhovuje klasickým požadavkům na učebnici. Mohou se však uplatnit při opakování učiva před maturitní zkouškou či přijímacími zkouškami na vysokou školu. Poslední z analyzovaných učebnic byla *Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník*, která prezentuje ucelený přehled středoškolské chemie a problematiku komplexů zpracovává v širokém rozsahu, odborně správně a s viditelným přesahem do každodenního života. Z toho důvodu může být tato kniha považována za materiál vhodný pro vyučující.

V experimentální části diplomové práce bylo připraveno 15 komplexních sloučenin oktaedrických komplexů s centrálním atomem chromu nebo kobaltu v oxidačním stavu +III. Pro výběr konkrétních komplexů byl důležitý záměr vytvoření didaktické pomůcky demonstrující vliv ligandu na štěpení d-orbitalu centrálního atomu. Již zmíněných 15 komplexů lze rozdělit do třech sérií vždy po pěti sloučeninách. Pro sérii s chromem jako centrálním atomem byly vybrány a syntetizovány koordinační sloučeniny: $K_3[Cr(CN)_6]$, $K_3[Cr(NCS)_6] \cdot 4H_2O$, $[Cr(urea)_6]Cl_3 \cdot 3H_2O$, $K_3[Cr(ox)_3] \cdot 3H_2O$, $[Cr(acac)_3]$. Do série komplexů kobaltu byly připraveny: $Na_3[Co(NO_2)_6]$, $Na_3[Co(CO_3)_3]Cl_3 \cdot 3H_2O$, $[Co(en)_3]Cl_3 \cdot 3H_2O$, $[Co(gly)_3]$ a $[Co(acac)_3]$. Poslední připravenou řadou byla série oktaedrických komplexů kobaltu typu $[Co(NH_3)_5X]$, kde X byl monodentátně vázaný ligand (X = Cl, H₂O, NH₃, ONO a NO₂). V rámci zmiňované série jsou dva komplexy

obsahující ligand NO_2^- , které jsou příklady komplexů demonstrujících vazebnou izomerii ligandu. Úspěšná příprava obou izomerních forem byla potvrzena změřením UV/VIS spekter a IČ spekter obou látek, které jsou součástí jedné z elektronických příloh práce. Všechny komplexy byly syntetizovány podle postupů z literatury.

Připravené komplexní sloučeniny byly využity k tvorbě didaktické pomůcky, která má podobu třech pětičlenných sérií. Každou sérii tvoří sada vzorků se shodným CA, ale odlišnou koordinační sférou. V rámci série byly připravené látky seřazeny podle spektrochemické řady ligandů, čímž lze demonstrovat vliv ligandového pole na štěpení d-orbitalů CA. Ve výsledku byla vytvořena i čtvrtá série, která je tvořena komplexy typu $[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_6]^z$, kde $\text{M} = \text{Mn}^{\text{II}}, \text{Cr}^{\text{III}}, \text{Fe}^{\text{II}}, \text{Co}^{\text{II}}$ a Ni^{II} . Jde tedy o sérii komplexů se shodnou koordinační sférou, co se týká ligandů a geometrie, ale lišících se typem CA. V průběhu diskuze o didaktických pomůckách byly připraveny návrhy stojanů na zkumavky - plastového (vhodného pro 3D tisk) a dřevěného (zhotoven pomocí laserové řezačky).

V rámci práce byla připravena série komplexů, které se viditelně liší svojí barevností, v důsledku čehož mohou sloužit pro demonstrování vlivu ligandů na spektrální vlastnosti. Jelikož je vnímání barev subjektivní a v závislosti na velikosti připravených krystalů se může lišit, byla pro připravené komplexy změřena UV/VIS spektra. Barevnost komplexů souvisí s jejich schopností absorbovat elektromagnetické záření dané vlnové délky, přičemž dochází k přechodům elektronů mezi energeticky rozštěpenými d-orbitaly. Naměřená spektra dokazují, že jedna látka může absorbovat ve více oblastech vlnových délek, a proto je pozorovaná barva směsí více doplňkových barev. Série komplexů typu $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{X}]^z$ byla využita také jako série vhodná k didaktické hře, jejímž cílem je seřazení komplexů na základě narůstající síly ligandu. Didaktické hře byl také uzpůsoben jeden ze dřevěných stojanů na zkumavky. Naměřená UV/VIS spektra byla využita také k vytvoření dalších dvou didaktických pomůcek. Jednou z nich jsou karty obsahující změřené UV/VIS spektrum a fotografii připravené sloučeniny. Využití karet je sledováno v tom, že na nich je možné vysvětlit základní zákonitosti spojené s barevností látek na konkrétních příkladech. Při práci s kartami získají žáci představu o tom, jak daná látka reálně vypadá (pozorované zbarvení), jaké je její absorpční spektrum a co z něj lze vyvodit. Pro úplnost je karta doplněna barevným kruhem s vhodným vyznačením doplňkových barev, a také barevnou škálou pod UV/VIS spektrem, která demonstruje barevné přechody a odpovídající vlnovou délku. Poslední připravenou pomůckou byla karetní hra – kvarteto, které představuje aktivizační didaktickou pomůcku využitelnou ve

výuce chemie. Jedná se o aktivitu, kterou je možné zařadit při nečekaném vývoji vyučování, např. když do konce vyučovací hodiny zbývá čas nebo jako shrnutí či opakování na konci hodiny. Také lze kvarteto považovat za pomůcku, která neinvazivním způsobem slouží k poskytnutí informace o souvislostech mezi pozorovatelnou barevností látek, složením a elektronovými spektry.

5 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se věnuje problematice koordinačních sloučenin ve výuce chemie na středních školách. Práce je rozdělena na část teoretickou, didaktickou a experimentální. Teoretická část obsahuje charakteristiky základních pojmů koordinační chemie jako je centrální atom, ligand, koordinačně-kovalentní vazba nebo koordinační číslo. Dále se teoretická část věnuje vybraným teoriím popisujícím koordinačně-kovalentní vazbu a zahrnuje také jakýsi postupný vývoj těchto teorií. Poslední kapitola teoretické části poskytuje stručný přehled způsobů přípravy koordinačních sloučenin.

Didaktická část práce se zaměřuje na zakomponování tématu koordinačních sloučenin do kurikulárních dokumentů školského systému České republiky. U pěti vybraných gymnázií byly porovnány ŠVP a to, zda se v nich téma koordinačních sloučenin, popř. v rámci kterého ročníku či učiva je zahrnuto. Dále se didaktická část diplomové práce věnuje analýze středoškolských učebnic z hlediska obsahu věnovanému koordinačním sloučeninám, pro kterou byly vybrány kromě využívaných učebnic i ty méně obvyklé.

V rámci experimentální části bylo připraveno celkem patnáct koordinačních sloučenin kobaltu nebo chromu v oxidačním stavu +III a s koordinačním číslem 6. Vybrané komplexy jsou charakteristické oktaedrickou koordinační sférou, která je tvořena jedním typem ligandu. Výjimkou je poslední série kobaltu, která obsahuje pentaaminkobaltitý kationt a šestý ligand je u jednotlivých vzorků odlišný. K připraveným sériím byly navrženy stojany na zkumavky (varianta dřevěného stojanu a stojanu plastového, vytisknutelného na 3D tiskárně), které společně s koordinačními sloučeninami tvoří didaktické pomůcky využitelné ve výuce chemie na střední škole reprezentující barevnost koordinačních sloučenin a posloupnost ligandů ve spektrochemické řadě ligandů. Pro připravené látky byla změřena UV/VIS spektra.

Série $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{X}]^z$ byla zároveň využita pro vytvoření didaktické hry založené existující spektrochemické řadě ligandů. Dalšími vytvořenými didaktickými pomůckami využitelnými ve výuce na střední škole byly karty se změřenými UV/VIS spektry připravených koordinačních sloučenin, které kromě spektra obsahují také fotografii připraveného komplexu a barevný kruh reprezentující doplňkovost barev. Poslední připravenou pomůckou byla karetní hra – kvarteto, pro které byly využity elementární

informace o připravených koordinačních sloučeninách (název, funkční a strukturní vzorec) a získaná UV/VIS spektra.

Vytvořené didaktické pomůcky umožňují zpestření výuky koordinační chemie na středních školách, s jejichž pomocí lze žákům snáze demonstrovat vybrané vlastnosti komplexů. Karty s UV/VIS spektry představují nadstavbový materiál, na kterém je možné pozastavit se nad barevností látek, dává prostor k vysvětlení absorpce elektromagnetického záření nebo v širším smyslu objasnit princip UV/VIS spektroskopie. Karetní hra – kvarteto je doplňkovou didaktickou pomůckou, jejíž smysl se nachází ve ztraktivnění výuky a možnosti aktivizace žáků. Zároveň z diplomové práce vyplývají cesty, kudy by šlo toto téma rozvíjet dál. Příkladem jsou UV/VIS spektra, pro které by bylo možné vytvořit pracovní listy zaměřené na měření UV/VIS spekter se školním experimentálním systémem Vernier. Vhodným námětem by bylo přiblížení tématu širší veřejnosti, tj. popularizace tématu na popularizačních akcích.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CA – centrální atom

L – ligand

en – ethylendiamin, ethan-1,2-diamin

Hacac – acetylaceton, penta-2,4-dion

HAO – hybridizovaný atomový orbital

CFT – Crystal Field Theory neboli Teorie krystalového pole

LFT – Ligand Field Theory neboli Teorie ligandového pole

MOT – Molecular Orbital Theory neboli Teorie molekulových orbitalů

MO – molekulový orbital

RVP G – Rámcový vzdělávací program pro gymnázia

RVP SOV – Rámcový vzdělávací program pro střední odborné vzdělávání

ŠVP – Školní vzdělávací program

PSP – periodická soustava prvků

H₂enCl – ethylendiamin dihydrochlorid

Hgly – glycin

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ¹ Constable E. C., Housecroft C. E., Coordination chemistry: the scientific legacy of Alfred Werner, Chem. Soc. Rev., **2013**, 42, 1429-1439.
- ² Kauffmann G. B., Coordination Chemistry, Washington DC, 1994, [online], dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-1994-0565.ch001>
- ³ Kauffmann G.B., Coordination Chemistry: History. Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry, John Wiley & Sons, Fresno, **2006**
- ⁴ Nedoma J., Koutník V., Hrdlička P., Anorganická a analytická chemie, nakl. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, **2001**, str. 29-32.
- ⁵ Březina F., Pastorek R., Koordinační chemie, nakl. Rektorát Univerzity Palackého, Olomouc, 1976, str. 7-38.
- ⁶ Housecroft C. E., Shape A. G., Anorganická chemie, nakl. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, **2014**, str. 219-228, 629, 649-666.
- ⁷ Vacík J., *Obecná chemie*, nakl. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Praha, **2017**, str. 91-94.
- ⁸ Jursík F., *Anorganická chemie kovů*, Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, **2002**, str. 67-75.
- ⁹ Greenwood N. N., Earnshaw A., *Chemie prvků*, 2. svazek, nakl. Praha: Informatorium, **1993**, str. 1121-1166.
- ¹⁰ Lawrance G. A., *Introduction to Coordination Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd, University of Newcastle, Callaghan, **2010**, str. 15-26.
- ¹¹ Muck A., *Základy strukturní anorganické chemie*, nakl. Academia, Praha, **2006**, str. 293-300.
- ¹² Gažo J., Serátor M., Šramko T., Zikmund M., Kohout J., *Všeobecná a anorganická chemia*, 2. vydání, nakl. Alfa, Bratislava **1978**, str. 532-564.
- ¹³ Ketelaar J. A. A., MacGillavry C. H., Renes P. A., *The crystal structure of aluminium chloride*, Recueil Des Travaux Chimiques Des Pays-Bas, **1947**, 66, 501-512.
- ¹⁴ Sacconi L., *Five-Coordination in 3d Metal Complexes*, Istituto di Chimica Generale ed Inorganica, Università de Firenze, Firenze, **1968**, [online], dostupné z: <http://publications.iupac.org/pac/pdf/1968/pdf/1701x0095.pdf>
- ¹⁵ Clare B. W., Kepert D. L., *Coordination Numbers & Geometries*, Encyclopedia of Inorganic Chemistry, John Wiley & Sons, **2006**.
- ¹⁶ Ruiz-Martínez A., Casanova D., Alvarez S., *Polyhedral Structures with and Odd Number of Vertices: Nine-Coordinate Metal Compounds*, Chem. Eur. J., **2008**, 14, 1291-1303.
- ¹⁷ Cotton S. A., Harrowfield J. M., *Lanthanides: Coordination Chemistry*, Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry, John Wiley & Sons Ltd., **2012**.
- ¹⁸ Bünzli J.-C. G., Klein B., Chapuis G., Schenk K. J., *The Structure of $[(C_6H_5)_4As]_2[Eu(NO_3)_5]$* , J. Inorg. Nuc. Chem., **1979**, 42, 1307-1311.
- ¹⁹ Rogers R. D., Rollins A. N., *Primary to Secondary Sphere Coordination of 18-crown-6 to Lanthanide (III) Nitrates: Structural Analysis of $[Pr(NO_3)_3(18-crown-6)]$ and $[M(NO_3)_3(OH_2)_3.18-crown-6]$ ($M=Y, Eu, Tb-Lu$)*, J. Chem. Crystallogr., **1994**, 24, 321-329.
- ²⁰ Daly S. R., Piccoli P. M. B., Schultz A. J., Todorova T. K., Gagliardi L., Girolami G. S., *Synthesis and Properties of a Fifteen-Coordinate Complex: The Thorium Aminoborane $[Th(H_3BNMe_2BH_3)_4]$* , Angew. Chem. Int. Ed., **2010**, 49, 3379-3381.

-
- ²¹ Popov I. A., Jian T., Lopez G. V., Boldyrev A. I., Wang L.-S., *Cobalt-centred boron molecular drums with highest coordination number in the CoB₁₆⁻ cluster*, Nat. Commun., **2015**.
- ²² Needham P., *The Source of Chemical Bonding*, Stud. Hist. Philos. Sci. A, Elsevier, **2013**, 45, str. 1-13.
- ²³ Pauling L., Herman Z. S., *Valence-Bond Concepts in Coordination Chemistry and the Nature of Metal-Metal Bonds*, J. Chem. Educ., **1984**, vol. 61 num.7, str. 582-587.
- ²⁴ Xue D., Sun C., Chen X., *Hybridization: A Chemical Bonding Nature of Atoms*, Chin. J. Chem., **2017**, 35, str. 1452-1458.
- ²⁵ Maksić Z. B., *Symmetry, Hybridization and Bonding in Molecules*, Comp. & Maths. with Appls., **1986**, 12B, str. 697-723.
- ²⁶ Leško J., Tržil J., Ullrych J., *Obecná chemie*, nakl. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, **2005**, str. 61-69.
- ²⁷ Marusak R. A., Doan K., Cummings S. D., *Integrated Approach to Coordination Chemistry: an Inorganic Laboratory Guide*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, **2007**, str. 5-8.
- ²⁸ Lawrance G. A., *Introduction to Coordination Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd, University of Newcastle, Callaghan, **2010**, str. 49-63.
- ²⁹ Stephanos J. J., Addison A. W., *Crystal Field Theory. Electrons, Atoms and Molecules in Inorganic Chemistry*, Elsevier Inc., **2017**, str. 403-470.
- ³⁰ Čidlová H., Mokrý Z., Valová B., *Obecná chemie*, Masarykova univerzita Brno, Brno, **2018**, str. 70.
- ³¹ Constable E. C., *A Short History of Coordination Compounds: The Journey From Plant Extracts to the Present Day*, Elsevier, **2020**.
- ³² Douglas B. E., McDaniel D. H., *Concepts and Models of Inorganic Chemistry*, Xerox College Publishing, Toronto, **1965**, str. 333-419.
- ³³ Rasmussen S. C., *The 18-electron rule and electron counting in transition metal compounds: theory and application*, Chem. Texts, **2015**, Vol. 1, 10.
- ³⁴ Ni D., Liu S., Wu M. Lei X., Xu B., Jun S.-Ch., Ouyang Ch., *Strong Jahn-Teller effect at NiO₄ tetrahedron in NiCo₂O₄ spinel*, Phys. Lett., **2020**, Vol. 384, 4.
- ³⁵ Patra S. G., Datta D., *Ligand field splitting in homoleptic tetrahedral d¹⁰ transition metal complexes. Spectrochemical series*, Comput. Theor. Chem., **2018**, 1130, 77-82.
- ³⁶ House J. E., *Ligand fields and molecular orbitals*, Inorganic Chemistry (3rd edition), **2020**, str. 687-715.
- ³⁷ Metody přípravy komplexních sloučenin [online], dostupné z:
https://is.muni.cz/el/1431/jaro2009/C4010/um/kap2-METODY_STUDIA_KOMPLEXu.pdf
- ³⁸ Zákon č. 561/2004 Sb., o předškolním, základním, středním vyšším odborném a jiném vzdělávání (školský zákon), **2004**, [online] dostupný z:
<https://www.zakonyprol S.-/2004-561#cast4>
- ³⁹ Balada J. et al., *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia: RVP G*, Výzkumný ústav pedagogický v Praze, Praha, **2007**.
- ⁴⁰ Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, *Národní program rozvoje vzdělávání v České republice: Bílá kniha*, nakl. Tauris, Praha, **2001**, str. 37-44.

-
- ⁴¹ Tupý J., *Tvorba kurikulárních dokumentů v České republice: Historicko-analytický pohled na přípravu kurikulárních dokumentů pro základní vzdělávání v letech 1989-2017*, Masarykova univerzita, Brno, **2018**, str. 60-65.
- ⁴² Masarykovo gymnázium, Střední zdravotnická škola a Vyšší odborná škola zdravotnická Vsetín, *Školní vzdělávací program - čtyřleté gymnázium - Chemie*, [online], dostupné z:
https://web.mgvsetin.cz/upload/files/svp/SVP_G4_12_Chemie_A.pdf
- ⁴³ Masarykovo gymnázium, Střední zdravotnická škola a Vyšší odborná škola zdravotnická Vsetín, *Školní vzdělávací program – volitelné předměty*, [online], dostupné z:
https://web.mgvsetin.cz/upload/files/svp/SVP_Volitelne-predmety.pdf
- ⁴⁴ Slovanské gymnázium Olomouc, *Školní vzdělávací program Slovanského gymnázia Olomouc pro vyšší gymnázium*, [online], dostupné z:
<https://www.sgo.cz/uploads/page/20/doc/C5%A0koln%C3%AD-vzd%C4%9B%C3%A1vac%C3%AD-program-vy%C5%A1%C5%A1%C3%AD-gymn%C3%A1zium.pdf>
- ⁴⁵ Gymnázium Olomouc – Hejčín, *Školní vzdělávací program – osmileté a čtyřleté gymnázium*, [online], dostupné z: <https://www.gytool.cz/soubory/SVP/2016-08-18%20SVP%202009.pdf>
- ⁴⁶ Gymnázium Olomouc – Hejčín, *Příloha Školního vzdělávacího programu – volitelné předměty*, [online], dostupné z:
https://www.gytool.cz/soubory/SVP/08_2020/PRILOHA_1_k_SVP_DG_PVP.pdf
- ⁴⁷ Gymnázium Slovanské náměstí Brno, *Školní vzdělávací program pro gymnaziální vzdělávání – čtyřletý vzdělávací program*, [online], dostupné z:
<http://www.gymnaslo.cz/files/users/vozak/2020/svpB.pdf>
- ⁴⁸ Gymnázium Elišky Krásnohorské, *Školní vzdělávací program – všeobecná gymnázium*, 2019, [online], dostupné z: <https://www.gekom.cz/files/14216MDF.pdf>
- ⁴⁹ Průcha J., Walterová E., Mareš J., *Pedagogický slovník, sedmé aktualizované a rozšířené vydání*, nakl. Praha Portál, **2013**, str. 323.
- ⁵⁰ Knecht P., Janík T. a kol., *Učebnice z pohledu pedagogického výzkumu*, nakl. Paido, Brno, **2008**, str. 19-26.
- ⁵¹ Maňák J., Knecht P., *Hodnocení učebnic*, nakl. Paido, Brno, **2007**, str. 11-40.
- ⁵² Hloušková L., *Obsahová analýza učebnice jako didaktického a historického textu*, Sborník prací filozofické fakulty Brněnské univerzity, **2000**.
- ⁵³ Honza J., Mareček A., *Chemie pro čtyřletá gymnázia: 2. díl*, nakl. Olomouc, Olomouc, **1998**.
- ⁵⁴ Vacík J., *Přehled středoškolské chemie*, nakl. SPN – pedagogické nakladatelství, Praha, **1995**.
- ⁵⁵ Flemr V., Dušek B., *Chemie pro gymnázia I. – obecná a anorganická*, nakl. SPN – pedagogické nakladatelství, Praha, **2001**.
- ⁵⁶ Benešová M., Satrapová H., *Odmaturuj! z chemie*, nakl. Didaktis, Brno, **2002**.
- ⁵⁷ Růžičková K., Kotlík B., *Chemie v kostce pro střední školy*, nakl. Fragment, Praha, **2013**.
- ⁵⁸ Gärtner H., Hoffmann M., Schaschke H., Schürmannová M., *Kompendium chemie: vzorce, pravidla a principy, úlohy a jejich řešení, periodická soustava prvků, výkladový slovník*, 2. vydání, nakl. Universum, Praha, **2013**.
- ⁵⁹ Obrátil V., Sáblík L., *Chemie pro spolužáky: Obecná chemie I.*, nakl. ProSpolužáky.cz, Hradec Králové, **2018**.

-
- ⁶⁰ Brauer G., *Handbook of Preparative Inorganic Chemistry*, ed. 2, New York-London, **1963**, str. 1372-1374,1379.
- ⁶¹ Fernelius W. C., Blanch J. E., *Inorganic Synthesis: vol. 5*, McGraw-Hill Book Company, New York, **1957**, str. 130.
- ⁶² Štarha P., Novotná R., Nemeč I., Trávníček Z., *Cvičení z anorganické chemie*, Olomouc, **2013**, str. 49-50.
- ⁶³ Shapley J. R., *Inorganic Syntheses*, **2004**, 34, str. 144.
- ⁶⁴ Antal P., Bártová I., Smékal Z., *Cvičení z anorganické chemie*, nakl. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, **2021**, str. 78-80, 96-97.
- ⁶⁵ Bauer H. F., Drinkard W. C., *A General Synthesis of Cobalt(III) Complexes; A New Intermediate, Na₃[Co(CO₃)₃]·3H₂O*, J. Am. Chem. Soc., **1960**, vol. 82, str. 5031-5032.
- ⁶⁶ Shalhoub G. M., *Co(acac)₃: Synthesis, Reactions and Spectra*, J. Chem. Educ., vol. 57, 7, **1980**.
- ⁶⁷ Alam M. M., Rahman S. M. M., Rahman M. M., Islam S. M., S., *Simultaneous Preparation of Facial and Meridional Isomer of Cobalt-Amino acid Complexes and their Characterization*, J. Sci. Res., **2010**, 2 (1), str. 91-98.
- ⁶⁸ Dassault Systèmes, SolidWORKS [software], verze 2019, **2018**.
- ⁶⁹ Ultimaker, Cura [software], verze 4.0, **2019**, dostupné z: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- ⁷⁰ Inkscape, verze 1.0.1., Inkscape Projekt, **2020**, dostupné z: <https://inkscape.org/>
- ⁷¹ Šmejkal P., Stratilová Urválková E., Trejbalová I., *Pokusy z obecné a fyzikální chemie: Praktikum*, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Praha, **2007**, str. 8-10. [online], dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/~kudch/main/JPD3/navody2007/5seminar.pdf>