



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ondřej Chwiedziuk

Barvicí invarianty uzlů

Katedra Algebry

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. David Stanovský, Ph.D.

Studijní program: Matematika pro informační
technologie

Studijní obor: Matematika pro informační
technologie

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Děkuji doc. RNDr. Davidu Stanovskému, Ph.D. za pomoc při řešení obtížných pasáží a cenné rady při psaní této práce. Dále bych rád poděkoval RNDr. Zuzaně Patákové, Ph.D. za revizi a kontrolu textu práce.

Název práce: Barvicí invarianty uzlů

Autor: Ondřej Chwiedziuk

Katedra: Katedra Algebry

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. David Stanovský, Ph.D., Katedra Algebry

Abstrakt: Uzly můžeme barvit různými konečnými quandy a zjišťovat, zda mají netriviální obarvení. Pokud ano, pak dokážeme říct, že daný uzel není rozvázatelný. V práci se však zaměříme na takové quandy, které vždy dávají triviální barvení. Ukáže se totiž, že mají totiž zajímavé algebraické vlastnosti. V této práci dokážeme, že quandle dává pro každý uzel triviální barvení, právě tehdy když je quandle reduktivní, a to je právě tehdy, když je barvicí invariant Vassilievův. Podobnou charakterizaci provedeme pro linky. Tedy quandle dává triviální barvení pro každý link, právě tehdy když se jedná o triviální quandle.

Klíčová slova: Reduktivní quandy, Barvení uzlů, Vassilievovy invarianty

Title: Coloring invariants of knots

Author: Ondřej Chwiedziuk

Department: Department of Algebra

Supervisor: doc. RNDr. David Stanovský, Ph.D., Department of Algebra

Abstract: We can color knots by various finite quandles and check if they have non-trivial coloring. If so, we can say that the knot is not an unknot. However, we will focus on quandles that always give trivial coloring. It will turn out that they have interesting algebraic properties. In this work, we will show that a quandle gives a trivial coloring for each knot if and only if the quandle is reductive, which is exactly when the coloring invariant is Vassiliev's. We will make a similar characterization for links. That is, a quandle gives a trivial coloring for each link if and only if it is a trivial quandle.

Keywords: Reductive quandles, Knot coloring, Vassiliev invariants

Obsah

Úvod	2
1 Quandlové barvení uzlů	4
1.1 Úvod do teorie uzlů	4
1.2 Úvod do teorie quandlů	6
1.3 Quandlové barvení	7
1.4 Souvislost	8
2 Triviální barvení	12
2.1 Reduktivita	12
2.2 Barvení pomocí souvislých quandlů	14
2.3 Barvení pomocí redukčních quandlů	16
3 Quandlové barvení jako Vassilievův invariant	18
3.1 Copánkový index	18
3.2 Vassilievovy invarianty	19
3.3 Charakterizace Vassilievových barvení uzlů	21
3.4 Charakterizace Vassilievových barvení linků	22
Seznam použité literatury	24

Úvod

Teorie uzlů je oblast topologie, která se zabývá uzly, což jsou jednoduché uzavřené křivky v trojrozměrném prostoru. Uzly samotné se v historii vyskytují v různých kulturách již od pravěku, ale teorie uzlů jako matematická disciplína vznikla až v 18. století. Mezi slavné matematiky, kteří se zasloužili o vznik a rozvoj této disciplíny, patří například C. F. Gauss (1777-1855), J. W. Alexander (1888-1971) nebo H. Seifert (1907-1996). Velký rozvoj nastal po druhé světové válce ve Spojených státech a Japonsku.

Mezi základní otázky patří, zda jsou dva uzly ekvivalentní, tedy zda je jeden z druhého možné získat spojitou deformací, aniž by se v nějakém okamžiku křivka protínala. Dlouho nebylo známé, jestli vůbec existuje algoritmus, který by dokázal rozhodnout, zda dva zadané uzly jsou ekvivalentní. Existence algoritmu byla prokázána článkem (Haken, 1962). Následně bylo v článku (Hass a kol., 1998) dokázáno, že jenom rozhodnutí, zda je uzel triviální, patří do kategorie NP. Na jejich práci bylo navázáno v článku (Kuperberg, 2014), kde byla dokázána komplementární vlastnost, že daný problém patří do třídy co-NP.

Základní technikou rozlišování uzlů je hledání invariantů. Mezi nejnámější invarianty patří takzvané barvení uzlů. Z počátku se jednalo např. o Foxovo barvení (Crowell a Fox, 1963), kdy je každý oblouk uzlového diagramu obarven jednou ze tří barev a platí, že na každém křížení se vyskytují všechny tři barvy, nebo je monochromatické. Tato technika se následně zobecnila na barvení pomocí quandlů.

Quandle je algebraická struktura, která vznikla přesně pro účely rozlišování uzlů. Takzvaný fundamentální quandle dokonce jednoznačně určuje uzly až na orientaci a překlopení, což dokázal D. Joyce v článku (Joyce, 1982). Bohužel, výpočet fundamentálního quandle je příliš složitý pro praktické použití. Jako zjednodušení se počítá počet homomorfismů do konečného quandle. Tomu pak říkáme barvení pomocí quandle. Obvykle však neuvažujeme triviální barvení, kdy je daný homomorfismus konstantní. Tudíž $\text{Col}_Q(K) = |\text{Hom}(Q_K, Q)| - |Q|$, kde Q_K je fundamentální quandle uzlu K .

Charakterizace quandle s triviálním barvením

V této práci se zaměříme na charakterizaci quandle, které dávají triviální obarvení pro všechny uzly. Hlavním výsledkem je následující věta:

Věta 1. *Bud' Q konečný quandle. Pak jsou následující tvrzení ekvivalentní:*

- 1) $\text{Col}_Q(K) = 0$ pro všechny uzly $K \in \mathcal{K}$.
- 2) $\text{Col}_Q(K)$ je Vassilievův invariant.
- 3) Q je reduktivní.

Výsledek je zajímavý především z hlediska toho, že zatímco (1) a (2) jsou tvrzení související především s teorií uzlů, tvrzení (3) je čistě algebraické, které vychází z teorie komutátorů pro quandle a s barvením uzlů nemá na první pohled

nic společného. Dále pak $(1) \implies (2)$ je zřejmá implikace, tak $(2) \implies (1)$ využívá jako prostředníka tvrzení (3) .

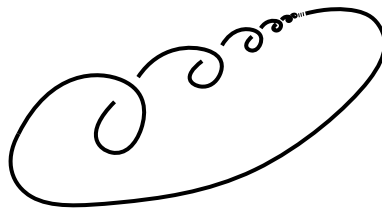
V první kapitole jsou definovány základní pojmy z teorie uzlů a quandlů. Ve druhé kapitole definujeme reduktivitu a ukážeme $(1) \iff (3)$. Ve třetí kapitole se zaměříme na Vassilievovy invarianty a ukážeme $(2) \iff (3)$. Také je zde dokázáno obdobné tvrzení pro linky, kde je barvení pomocí quandlů Vassilievův invariant právě tehdy, když je quandle triviální.

Tato práce vychází především ze tří článků: (Johnson, 1980), (Eisermann, 1999) a (Bonatto a kol., 2021). Využijeme podobné důkazové techniky, abychom dosáhli výše uvedeného výsledku. Zatímco (Johnson, 1980) a (Eisermann, 1999) se zabývají fundamentálními grupami uzlů, v této práci se obdobná tvrzení formulují pro quandly. Naopak (Bonatto a kol., 2021) se zabývá reduktivitou quandlů, ovšem nezabývá se vztahem reduktivity a barvení uzlů. Tudíž formulace a důkaz věty 1 je novým výsledkem.

1. Quandlové barvení uzlů

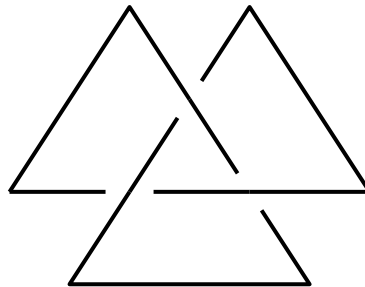
1.1 Úvod do teorie uzlů

Základním matematickým objektem, o kterém tato práce pojednává, je *uzel*. Obvykle se tímto pojmem myslí vnoření uzavřené jednoduché křivky do trojrozměrného prostoru. Ovšem tahle definice skýtá drobná úskalí v podobě takzvaných *divokých uzlů* (v angličtině *wild knots*), které jde jen velmi obtížně studovat. Např. následující uzel má jako svoji součást nekonečnou posloupnost zatočení. A takový v reálném světě nikdy nepotkáme.



Obrázek 1.1: Divoký uzel

Abychom se těmito uzly vyhnuli, budeme používat definici (Murasugi, 1996, p. 6), využívající místo spojitých křivek pouze polygonální křivky. Tedy uzlem rozumíme jednoduchou uzavřenou lomenou čáru. Takovýmto uzly se pak říká *krotké uzly* (v angličtině *tame knots*). Množinu všech takových uzlů značíme \mathcal{K} .

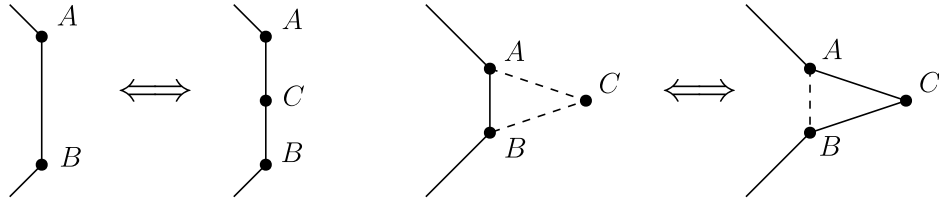


Obrázek 1.2: Trojlístek

Příbuzným pojmem je *link*, což je konečné disjunktní sjednocení uzlů. Množinu všech linků značíme \mathcal{L} . Linky sdílejí s uzly mnoho vlastností, ovšem v této práci se jim budeme věnovat pouze v poslední kapitole. Jiným zobecněním je *orientovaný uzel*, kdy si na uzlu zvolíme orientaci. Pokud jde o link, orientace je dána na každém uzlu zvlášť.

Existuje nespočetně mnoho uzlů, a proto se nabízí otázka, jak je klasifikovat. Velmi přirozený způsob je zavést *ekvivalenci* uzlů. V reálném světě si můžeme uzly představit jako provázky, které mají spleené konce a jsou různě zamotány do prostoru. Tento provázek můžeme libovolně deformovat, ale nesmíme ho přetrhnout. Na základě toho pak můžeme dva uzly prohlásit za ekvivalentní, pokud dokážeme jeden získat z druhého pomocí takovýchto deformací. Tento způsob klasifikace je velmi intuitivní, tudíž by bylo vhodné ho reflektovat i v matematické teorii.

Pro uzel K si nejprve zavedeme *základní pohyby* dle obrázku 1.3:



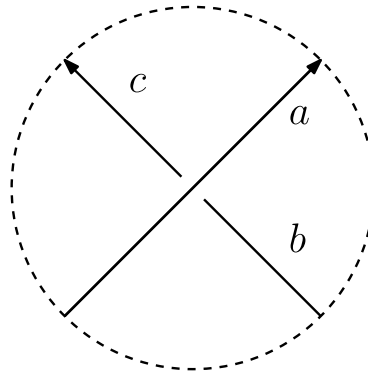
Obrázek 1.3: Základní pohyby

- 1) Mějme hranu křivky K danou vrcholy A a B . Pak můžeme umístit nový vrchol C na hranu AB . Naopak, pokud existuje vrchol C na hraně AB , která náleží do uzlu K , můžeme ho odstranit.
- 2) Mějme hranu AB v K a nějaký vrchol C ležící mimo K . Pak pokud platí, že $ABC \cap K = AB$, pak můžeme hranu AB nahradit hranami AC a CB . Inverzně můžeme za splnění obdobných podmínek nahradit hrany AC a CB za hranu AB .

Tyto dva pohyby reflektují intuitivní představu o tom, jak můžeme uzly deformovat. Následně můžeme definovat relaci ekvivalence tak, že uzly K a K' jsou ekvivalentní, pokud existuje konečná posloupnost základních pohybů, která transformuje jeden uzel v druhý. Tuto relaci značíme $K \cong K'$.

Jelikož je práce s objekty ve třech rozměrech velmi obtížná, zavedeme si *diagramy* uzlů. Jedná se o projekce uzlů do roviny, zatímco zachováváme informaci o kříženích tím, že spodní část křivky v místě křížení přerušíme. Zároveň zakážeme patologické případy, kdy dojde pouze k překryvu dvou částí křivky, který není křížením. Diagram uzlu K budeme značit D_K . Množinu všech diagramů uzlu K značíme $D(K)$.

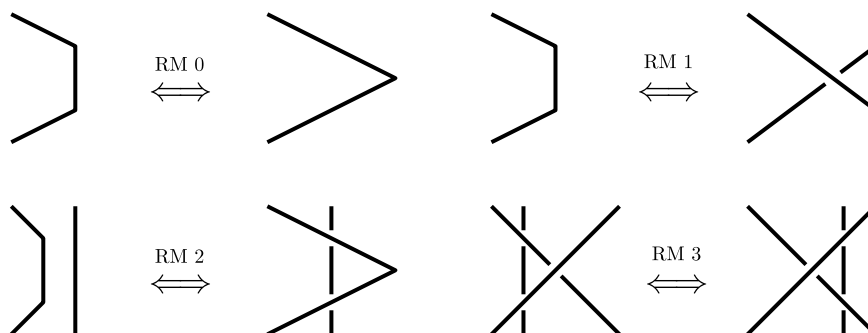
Takto daný diagram se skládá z *oblouků*, jimiž rozumíme souvislé komponenty diagramu. Množinu všech oblouků diagramu D_K značíme $O(D_K)$. Dále místa, kde dochází k přerušení křivky, nazýváme *křížení*. Toto křížení budeme zapisovat jako uspořádanou trojici oblouků, které se v daném místě kříží, ve tvaru (a, b, c) podle obrázku 1.4. Množinu všech křížení diagramu D_K značíme $C(D_K)$.



Obrázek 1.4: Křížení

Na diagramech můžeme definovat ekvivalenci. Dva diagramy D_K a $D_{K'}$ jsou ekvivalentní, pokud platí, že $K \cong K'$. Navíc, můžeme ekvivalenci zavést přímo na diagramech a to pomocí tzv. *Reidemeisterových pohybů*. Jsou obdobou základních pohybů pro diagramy a platí, že dva diagramy jsou ekvivalentní, pokud jeden

získáme z druhého pomocí konečné posloupnosti Reidemeisterových pohybů. Reidemeisterovy pohyby jsou znázorněny na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Reidemeisterovy pohyby

Na rozlišování uzlů budeme využívat *invarianty*. Invariantem I rozumíme takové zobrazení z množiny všech uzlů do nějaké množiny, které je konstantní na ekvivalentních uzlech. Tedy pokud $K_1 \cong K_2$, pak $I(K_1) = I(K_2)$. Invariant se nazývá *úplný*, pokud platí, že $I(K_1) = I(K_2)$ implikuje $K_1 \cong K_2$. Jelikož je ekvivalence uzlů daná pomocí Reidemeisterových pohybů, stačí ověřit, že se invariant zachovává na těchto pohybech.

Mezi základní invarianty patří třeba *crossing number*, což je nejmenší možný počet křížení přes všechny diagramy jednoho uzlu. Dalšími příklady jsou *unknotting number*, *bridge number* nebo *genus*. V této práci se budeme věnovat invariantům založeným na quandleovém barvení.

1.2 Úvod do teorie quandleů

Quandle vznikl jako algebraická struktura, která respektuje Reidemeisterovy pohyby, a je tak vhodná pro rozlišování uzlů. V této podkapitole rozvinu základní teorii kolem těchto algebraických struktur.

Definice 1. *Quandlem* $Q = (C, *)$ rozumíme algebraickou strukturu nad množinou C s binární operací $*$, splňující následující podmínky pro všechna $a, b, c \in C$:

- 1) $a * a = a$ (idempotence);
- 2) $\exists! x \in C : a * x = b$ (jednoznačné levé dělení, značíme $x = a *^{-1} b$);
- 3) $a * (b * c) = (a * b) * (a * c)$ (levá sebedistributivita).

Příklad. Příkladem quandle je například *triviální jednoprvkový quandle* $Q = (\{a\}, *)$, kde $a * a = a$. Značme ho jako T_1 . *Triviální quandle* nad A definujeme tak, že vezmeme množinu A a definujeme $a * b = b$ pro všechna $a, b \in A$. Takový quandle značíme T_A .

Příklad. Dalším příkladem může být quandle daný konjugací v grupě G . Pro $a, b \in G$ definujeme $a * b = aba^{-1}$. Tento quandle značíme $\text{Conj}(G)$.

Na quandlech nyní zavedeme základní pojmy běžné i pro jiné algebraické struktury, jako homomorfismy, podalgebry a faktoralgebry běžné v univerzální algebře. Pomocí nich pak můžeme lépe porozumět vlastnostem quandleů.

Definice 2. Mějme quandy Q a W . Pak *quandlovým homomorfismem* $\varphi : Q \rightarrow W$ rozumíme zobrazení, které zachovává quandlovou operaci, tedy $\varphi(a * b) = \varphi(a) * \varphi(b)$ pro všechna $a, b \in Q$.

Definice 3. Mějme quandle $(Q, *)$. Pak *podquandlem* $W \preceq Q$ rozumíme dvojici $(W, *_|_W)$, kde $W \subseteq Q$ a platí, že W je uzavřená na operaci $*$ jakožto zúžení operace z Q .

Definice 4. Buď Q quandle. Na něm zavedeme relaci ekvivalence α takovou, že $[a]_\alpha * [b]_\alpha = [a * b]_\alpha$ pro všechna $a, b \in Q$. Vzniklý quandle definovaný na blocích ekvivalence značíme Q/α a nazýváme *faktorquandlem* quandle Q podle ekvivalence α .

Víme, že $a \mapsto [a]_\alpha$ je homomorfismus z Q na Q/α . Také platí, že pokud máme homomorfismus $\varphi : Q \rightarrow W$, pak jádro, tj množina $\text{Ker } \varphi = \{(a, b) \in Q \times Q : \varphi(a) = \varphi(b)\}$, tvoří kongruenci na Q a faktorquandle $Q/\text{Ker } \varphi$ je izomorfní s obrazem $\text{Im } \varphi(Q) \preceq W$. Jedná se o klasický výsledek univerzální algebry, který můžeme nalézt např. v knize (Ježek, 2008). Dalším takovým výsledkem je, že kongruence tvoří svaz:

Uvažujme kongruence α na quandle Q a na nich definujeme uspořádání inkluzí. Tato částečně uspořádaná množina tvoří svaz, který značíme $\text{Con}(Q)$. Minimální prvek tohoto svazu značíme 0_Q a jedná se o kongruenci $\{(a, a) : a \in Q\}$. Maximální prvek značíme 1_Q a je roven $Q \times Q$.

1.3 Quandlové barvení

Nyní definujeme pojmy *fundamentální quandle* a *quandlové barvení*, které nám dávají invarianty založené na quandlech.

Definice 5. *Volným quandlem* Q_X nad neprázdnou množinou X rozumíme quandle takový, že pro zobrazení $f : X \rightarrow Q$, kde Q je libovolný quandle, existuje právě jeden homomorfismus $\varphi : Q_X \rightarrow Q$ takový, že $\varphi(x) = f(x)$ pro všechna $x \in X$.

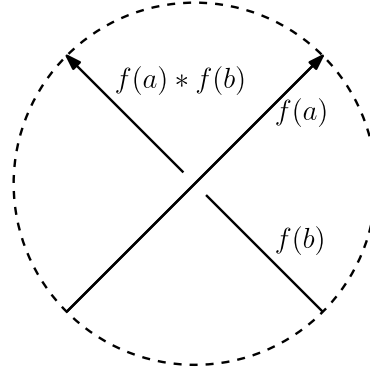
Existence a jednoznačnost až na izomorfismus můžeme opět nalézt v knize (Ježek, 2008).

Definice 6. Mějme K uzel, D_K jeho diagram, pak *fundamentálním quandlem* Q_K rozumíme volný quandle nad množinou oblouků $O(D_K)$, který vyfaktorizujeme relací α definovanou následovně: pro každé křížení $(a, b, c) \in C(D_K)$ platí $a * bac$.

Tvrzení 2 (Joyce, 1982). *Fundamentální quandle Q_K je úplným invariantem až na orientaci.*

Fundamentální quandle dává sice velmi silný invariant, ale je těžké ho spočítat. Fundamentální quandle je nekonečný a určit, zda jsou dva takové quandy izomorfní, je velmi obtížné. Proto se spíše používá z něj odvozený invariant, kterému se říká *quandlové barvení*. Jedná se o počet homomorfismů z fundamentálního quandle do námi zvoleného konečného quandle. Jenže, můžeme si povšimnout, že vždy existuje triviální homomorfismus, který posílá všechny prvky z volného quandle na jeden fixovaný prvek. Tudíž tyto homomorfismy zanedbáme. Tento invariant je sice slabší, ale lze mnohem snadněji spočítat.

Definice 7. Mějme uzel K , jeho fundamentální quandle Q_K a libovolný quandle W . Pak *počtem obarvení* $\text{Col}_W(K)$ rozumíme počet netriviálních homomorfismů $\varphi : Q_K \rightarrow W$. Tedy $\text{Col}_W(K) = |\text{Hom}(Q_K, W)| - |W|$.



Obrázek 1.6: Barvení pomocí quandle

Jak takový invariant funguje, si ukážeme na příkladu *Foxova quandle*. Začneme definicí tohoto quandle. Originálně je Foxovo barvení definováno jako barvení oblouků jednou ze tří barev tak, aby na každém křížení měly všechny tři oblouky buď stejnou barvu, nebo navzájem různou. Nyní vyjádříme Foxovo barvení pomocí jazyka quandleových homomorfismů. Foxův quandle F definujeme následující tabulkou:

*	1	2	3
1	1	3	2
2	3	2	1
3	2	1	3

Nyní si vezměme uzel K a jeho fundamentální quandle Q_K . Jelikož je fundamentální quandle definován jako volný quandle na obloucích diagramu modulo relace na kříženích, tak pokud každému oblouku přiřadíme jednu ze tří barev (tj. prvků z F), tak definujeme homomorfismus f z Q_K do F . Jenže ne každé obarvení je homomorfismus, protože musí splňovat relace dané kříženími. Mějme křížení (a, b, c) . Pak víme, že $f(a) * f(b) = f(c)$, viz obrázek 1.6. Tedy pokud $f(a) = f(b)$, pak i $f(c) = f(a)$. Naopak, pokud $f(a) \neq f(b)$, tak $f(c) \neq f(a), f(b)$. Toto nám dává přesně pravidla Foxova barvení.

1.4 Souvislost

V této sekci se budeme zabývat souvislými quandly. Tato třída je důležitá hned ze dvou důvodů. Prvním je, že všechny konečné quandly lze rozložit na souvislé podquandly. Druhým je, že fundamentální quandle uzlu je souvislý.

Definice 8. Mějme quandle Q . Pak L_q značí levou translaci o $q \in Q$, tedy $L_q(x) = q * x$. Grupa generovaná levými translacemi se značí $\text{Inn}(Q)$ a nazývá se *grupa vnitřních automorfismů* quandle Q .

Definice 9. Mějme quandle Q . Pokud platí, že je působení $\text{Inn}(Q)$ na Q tranzitivní, pak říkáme, že Q je souvislý quandle.

Lemma 3. *Mějme konečný quandle Q . Pak jsou následující tvrzení ekvivalentní:*

- 1) Q je souvislý;
- 2) pro každé dva prvky $a, b \in Q$ platí, že existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q$ taková, že

$$x_1 *^{\varepsilon_1} (x_2 *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (x_n *^{\varepsilon_n} a)) \dots) = b,$$

kde $\varepsilon_i \in \{-1, 1\}$.

Důkaz.

- (1) \Rightarrow (2): Mějme $a, b \in Q$. Jelikož je Q konečný, tak platí, že $|\text{Inn}(Q)| \leq |Q|!$, tedy $\text{Inn}(Q)$ je konečná grupa. Tudíž pro každý prvek $\varphi \in \text{Inn}(Q)$ existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q$ taková, že $\varphi = L_{x_1}^{\varepsilon_1} \circ L_{x_2}^{\varepsilon_2} \circ \dots \circ L_{x_n}^{\varepsilon_n}$, kde L_x je levá translace o x .

Jelikož $\text{Inn}(Q)$ je tranzitivní, tak existuje $\varphi \in \text{Inn}(Q)$ taková, že $\varphi(a) = b$. Tedy existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q$ taková, že

$$x_1 *^{\varepsilon_1} (x_2 *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (x_n *^{\varepsilon_n} a)) \dots) = b.$$

- (2) \Rightarrow (1): Jelikož každé dva prvky dokážeme spojit konečnou posloupností translací, tak platí, že grupa G daná levými translacemi $\text{Inn}(Q)$ působí tranzitivně na Q . Tudíž je Q souvislý. □

Lemma 4. *Mějme quandle Q a grupu vnitřních automorfismů $\text{Inn}(Q)$. Pak platí, že působení $\text{Inn}(Q)$ na Q rozkládá Q na orbity a každá orbita je podquandle.*

Důkaz. Zafixujme orbitu W . Pak platí, že W je uzavřená na operaci $*$, jelikož pokud $a, b \in W$, tak $a * b = L_a(b) \in W$. Zároveň je uzavřená na levé dělení, jelikož pokud $a, b \in W$, tak $a *^{-1} b = L_a^{-1}(b) \in W$. Tedy W je podquandle. □

Příklad. Mezi souvislé quandly patří např. Foxův quandle F . Naopak, mezi nesouvislé patří triviální quandly T_n , kde $n > 1$. Tyto quandly se rozpadnou na n jednoprvkových podquandlů T_1 , které jsou triviálně souvislé.

Obecně neplatí, že působením $\text{Inn}(Q)$ na Q dostaneme souvislé quandly. Je to z toho důvodu, že působení $\text{Inn}(Q)$ na jednu orbitu Q' může být tranzitivní, ale z pohledu té orbity se jedná o působení $\text{Aut}(Q')$. A tedy může nastat, že $\text{Inn}(Q')$ není tranzitivní na Q' . Pro konečné quandly však platí, že se dají rekurzivně rozložit na souvislé podquandly.

Tvrzení 5 (Ehrman a kol., 2006). *Mějme quandle Q . Pak platí, že se dá jednoznačně rozložit na maximální souvislé podquandly (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) .*

Důkaz. Mějme quandle Q a grupu vnitřních automorfismů $\text{Inn}(Q)$. Podle lemmatu 4 platí, že působení $\text{Inn}(Q)$ na Q rozkládá Q na orbity a každá orbita je podquandle. Jelikož je Q konečný, tak má konečně mnoho orbit. Pokud je orbita souvislá, tak jsme skončili. Pokud ne, znovu aplikujeme lemma 4. Takto pokračujeme, dokud nedostaneme rozklad na souvislé podquandly. Jelikož je Q konečný a velikost orbit se zmenšuje, tak se vždy dostaneme do souvislého podquandlu.

Rozklad je jednoznačný, jelikož pokud by existovaly dva různé rozklady, tak by existovaly dva různé souvislé podquandly W a W' , které se protínají, jenže by to znamenalo, že se dokážeme z každého prvku v W dostat do W' a naopak, což by znamenalo, že tvoří jeden souvislý quandle a jsou shodné, což je spor. \square

Definice 10. Mějme quandle Q . Pak *rozkladem* quandle Q rozumíme rozklad na souvislé podquandly (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) . Podquandle Q_i nazýváme *komponenta* Q .

Nyní se podíváme, jak se chová souvislost při homomorfismech.

Lemma 6 (Bonatto a kol., 2019). *Uvažujme quandly Q a W , rozklad Q jako Q_1, Q_2, \dots, Q_n a homomorfismus $\varphi : Q \rightarrow W$. Pak platí, že homomorfním obrazem Q_i je souvislý podquandle $\varphi(Q_i) = W_i \preceq W$.*

Důkaz. Mějme $a, b \in Q$ ve stejné komponentě. Pak podle lemmatu 3 existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q$ taková, že

$$x_1 *^{\varepsilon_1} (x_2 *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (x_n *^{\varepsilon_n} a)) \dots) = b.$$

Nyní, když máme homomorfismus $\varphi : Q \rightarrow W$, tak platí, že

$$\varphi(x_1) *^{\varepsilon_1} (\varphi(x_2) *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (\varphi(x_n) *^{\varepsilon_n} \varphi(a)) \dots)) = \varphi(b).$$

Tedy platí, že $\varphi(a)$ a $\varphi(b)$ jsou ve stejné komponentě. \square

Speciálně, pokud je Q souvislý quandle, tak jeho homomorfním obrazem je také souvislý quandle.

Lemma 7 (Joyce, 1982). *Mějme uzel K a jeho fundamentální quandle Q_K . Pak platí, že Q_K je souvislý quandle.*

Důkaz. Mějme $a, b \in Q_K$ generátory. Pak chceme ověřit, že existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q_K$ taková, že $x_1 *^{\varepsilon_1} (x_2 *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (x_n *^{\varepsilon_n} a)) \dots) = b$. Jenže, jelikož jsou a, b generátory, tak odpovídají nějakým obloukům $a', b' \in O(D_K)$. Posloupnost prvků x_1, x_2, \dots, x_n pak dostaneme tak, že začneme v a' a půjdeme ve směru k b' . Pokaždé, když narazíme na křížení, kde je x'_i most, tak si přidáme x_i do posloupnosti s příslušným znaménkem operace. Jelikož a, b leží na stejném uzlu, tak se tímto způsobem dostaneme z a do b .

Tohle platí pro všechny generátory, tedy i pro všechny prvky Q_K , jelikož každý prvek je generován posloupností generátorů. Tudíž je Q_K souvislý quandle. \square

Z lemmat 6 a 7 plyne, že obraz fundamentálního quandlu je souvislý quandle. Jenže to znamená, že nám při výpočtu $\text{Col}_Q(K)$ stačí uvažovat pouze souvislé quandly. Speciálně je jedním z důsledků následující lemma:

Lemma 8. *Mějme quandle Q , který není souvislý, a uzel K . Pak platí, že*

$$Col_Q(K) = \sum_{i=1}^n |Col_{Q_i}(K)|,$$

kde Q_i jsou komponenty rozkladu Q .

Důkaz. Mějme homomorfismus $\varphi \in \text{Hom}(Q_K, Q)$. Jelikož je Q_K podle 7 souvislý, tak podle lemmatu 6 platí, že $\varphi(Q_K)$ je souvislý podquandle Q . Jelikož se Q rozkládá na komponenty, které jsou souvislé, tak platí, že φ náleží do $\text{Hom}(Q_K, Q_i)$ pro nějaké i . Zároveň patří nejvýše do jedné takové množiny, jelikož jsou orbity disjunktní. Jelikož je φ libovolný homomorfismus, tak platí, že

$$Col_Q(K) = \sum_{i=1}^n |Col_{Q_i}(K)|.$$

□

2. Triviální barvení

2.1 Reduktivita

V této sekci se budeme zabývat reduktivními quandy. Tyto quandy jsou studovány v článcích (Bonatto a kol., 2021), (Bonatto a Stanovský, 2021) a (Jedlička a kol., 2020). Ovšem jejich motivace při definici reduktivity je čistě algebraická. My se budeme zabývat reduktivitou ve vztahu k uzlům a jejich barvením. V této kapitole vycházím primárně z prvního zmíněného článku.

Definice 11. Buď $n \in \mathbb{N}$. Pak quandle Q nazýváme n -reduktivní, pokud platí, že všechny $a, b, c_1, c_2, \dots, c_n \in Q$ splňují:

$$((\dots (a * c_1) \dots) * c_{n-1}) * c_n = ((\dots (b * c_1) \dots) * c_{n-1}) * c_n$$

Říkáme, že Q je *reduktivní*, pokud existuje $n \in \mathbb{N}$, že je n -reduktivní.

Definice 12. Buď Q quandle a $\alpha \in \text{Con}(Q)$ relace na Q . Pak definujeme grupu $\text{Dis}_\alpha = \langle L_a L_b^{-1} : a \alpha b \rangle \trianglelefteq \text{Inn}(Q)$. Tato grupa se nazývá *pohybová grupa* quandle Q podle relace ekvivalence α .

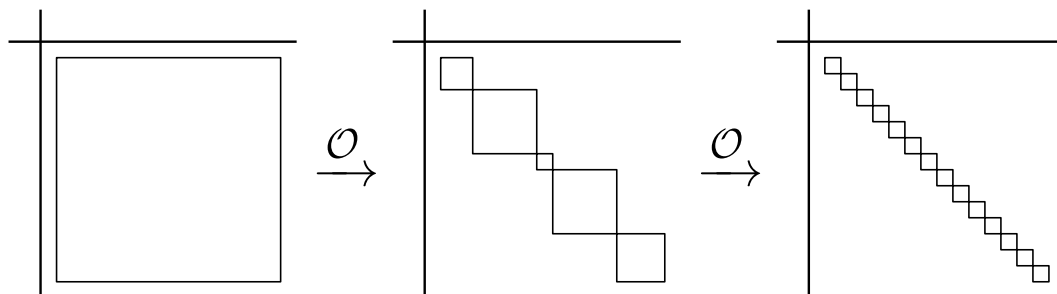
Obecně platí, že pohybové grupy $\text{Dis}_\alpha \trianglelefteq \text{Inn}(Q)$. Toho využijeme při definici kongruence na quandlech.

Definice 13. Buď Q quandle a $N \trianglelefteq \text{Inn}(Q)$. Pak definujeme $\mathcal{O}(N) = \{(a, b) \in Q \times Q : \varphi(a) = b, \varphi \in N\}$.

Pokud budeme volit $N = \text{Dis}_\alpha$, kde $\alpha \in \text{Con}(Q)$, tak můžeme dostat robustnější definici rozkladu na souvislé komponenty, která nám umožňuje s nimi lépe pracovat za pomoci kongruencí. První iterace vlastně odpovídá rozkladu na orbity pod působením $\text{Inn}(Q)$.

Definice 14. Buď Q quandle. Pak definujeme $\mathcal{O}^0(Q) = 1_Q$. Dále definujeme $\mathcal{O}^{n+1}(Q) = \mathcal{O}(\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)})$.

Cílem je ukázat, že pokud $\mathcal{O}^n(Q) = 0_Q$, tedy se dostaneme do stavu jako na obrázku 2.1, pak je Q reduktivní a naopak. Abychom mohli využít síly výše definované konstrukce, potřebujeme nejprve technické lemma.



Obrázek 2.1: Rozklad quandle na komponenty

Lemma 9. *Bud' Q quandle a $\alpha \in \text{Con}(Q)$. Pak platí, že*

$$\mathcal{O}^n(Q/\alpha) = \{[b]_\alpha : b \in \mathcal{O}^n(Q) a\}.$$

Důkaz. Tvrzení dokážeme indukcí podle n . Pro $n = 0$ je tvrzení triviální, protože vlastně jen popisuje úvodní definici.

Dále budeme předpokládat, že tvrzení platí pro n . Tedy:

$$\{[b]_\alpha : [b]_\alpha \in \mathcal{O}^n(Q/\alpha) [a]_\alpha\} = \{[b]_\alpha : b \in \mathcal{O}^n(Q) a\}.$$

Nyní vezměme přirozenou projekci $\pi_\alpha : \text{Inn}(Q) \rightarrow \text{Inn}(Q/\alpha)$ definovanou jako $\pi_\alpha(L_a) = L_{[a]_\alpha}$. Pak platí, že $\pi_\alpha(\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)}) = \text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q/\alpha)}$, jelikož grupa na pravé straně je generována prvky tvaru $L_{[a]_\alpha} L_{[b]_\alpha}^{-1}$, kde $[a]_\alpha \in \mathcal{O}^n(Q/\alpha) [b]_\alpha$. Jenže $L_{[a]_\alpha} L_{[b]_\alpha}^{-1} = \pi_\alpha(L_a) \pi_\alpha(L_b)^{-1} = \pi_\alpha(L_a L_b^{-1})$. To jsou ale generátory grupy $\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)}$, protože $b \in \mathcal{O}^n(Q) a$.

Zafixujme si prvek $A = [a]_{\mathcal{O}^{n+1}(Q/\alpha)} = \{d([a]_\alpha) : d \in \text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q/\alpha)}\}$. Z tvrzení výše plyne, že

$$A = \{\pi_\alpha(h)([a]_\alpha) : h \in \text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q/\alpha)}\} = \{[h(a)]_\alpha : h \in \text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)}\}.$$

Z toho už ale dostáváme, že:

$$[a]_{\mathcal{O}^{n+1}(Q/\alpha)} = \{b_\alpha : b \in \mathcal{O}^{n+1}(Q) a\} = \{[b]_\alpha : b \in \mathcal{O}^{n+1}(Q) a\},$$

což jsme chtěli dokázat. □

Tvrzení 10 (Bonatto a kol., 2021). *Bud' Q konečný quandle. Pak jsou následující podmínky ekvivalentní:*

- 1) Q je n -reduktivní pro nějaké $n \in \mathbb{N}$.
- 2) $\mathcal{O}^n(Q) = 0_Q$ pro nějaké $n \in \mathbb{N}$.
- 3) Pro každou komponentu Q_i rozkladu Q platí, že $|Q_i| = 1$.

Důkaz. (1) \implies (2):

Dokážeme indukcí podle n :

Případ $n = 1$ je triviální, protože se jedná o triviální quandle T_m a tudíž $\mathcal{O}^1(Q) = 0_Q$.

Dále buď Q $(n+1)$ -reduktivní. Zadefinujme homomorfismus $L : Q \rightarrow Q$ tak, že $L : x \mapsto L_x$. Tím dostaneme faktorquandle definovaný jako $Q/\lambda = L(Q)$, který je ale n -reduktivní. Podle indukčního předpokladu tedy platí, že $\mathcal{O}^n(Q/\lambda) = 0_{Q/\lambda}$. Z lemmatu 9 pak plyne, že $\{[b]_\lambda : b \in \mathcal{O}^n(Q) a\} = [[a]_\lambda]_{\mathcal{O}^n(Q/\lambda)} = \{[a]_\lambda\}$. Tedy pokud $b \in \mathcal{O}^n(Q) a$, tak $[b]_\lambda = [a]_\lambda$ a tudíž i $b = a$. Tedy $\mathcal{O}^n(Q) \subseteq \lambda$ a tudíž $\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)} \leq \text{Dis}_\lambda$. Z toho plyne, že $\mathcal{O}^{n+1}(Q) = \mathcal{O}(\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)}) \subseteq \mathcal{O}(\text{Dis}_\lambda) = 0_Q$. Tedy $\mathcal{O}^{n+1}(Q) = 0_Q$.

(2) \implies (1):

Také dokážeme indukcí podle n :

Případ $n = 1$ je triviální ze stejného důvodu jako výše.

Dále předpokládejme, že $\mathcal{O}^{n+1}(Q) = 0_Q$. Definujme $Q' = Q/\mathcal{O}^n(Q)$. Přirozená projekce $\pi_{\mathcal{O}^n(Q)}$ posílá $\text{Dis}_{\mathcal{O}^k(Q)}$ na $\text{Dis}_{\mathcal{O}^k(Q)/\mathcal{O}^n(Q)}$ a podle lemmatu 9 platí, že $\mathcal{O}^k(Q') = \mathcal{O}^k(Q)/\mathcal{O}^n(Q)$ pro každé $k \leq n$. Tudíž Q' má řetěz kongruencí:

$$1_{Q'} = \mathcal{O}^0(Q') \subseteq \mathcal{O}^1(Q') \subseteq \dots \subseteq \mathcal{O}^n(Q') = \mathcal{O}^n(Q)/\mathcal{O}^n(Q) = 0_{Q'}.$$

Z indukce víme, že Q' je n -reduktivní. Jelikož $\mathcal{O}^{n+1}(Q) = 0_Q$, pak orbity $\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)}$ jsou triviální. Tedy $\text{Dis}_{\mathcal{O}^n(Q)} \subseteq \lambda$. Reduktivitu si můžeme reformulovat tak, že platí:

$$((\dots (a * c_1) \dots) * c_{n-1}) * c_n \lambda = ((\dots (b * c_1) \dots) * c_{n-1}) * c_n \lambda.$$

Z toho ale plyne, že Q je $(n+1)$ -reduktivní.

(2) \implies (3):

Vidíme, že $\mathcal{O}^n(Q)$ odpovídá tomu, že budeme postupně rozkládat Q na menší a menší orbity, až dosáhneme rozkladu na souvislé komponenty. Jelikož $\mathcal{O}^n(Q) = 0_Q$, tak všechny komponenty mají velikost 1.

(3) \implies (2):

Pokud všechny komponenty rozkladu mají velikost 1, tak to znamená, že existuje $n \leq |Q|$ takové, že $\mathcal{O}^n(Q) = 0_Q$, protože Q je konečný quandle. □

Důsledek 11. *Jediný souvislý reduktivní quandle je T_1 .*

Důkaz. Mějme souvislý reduktivní quandle Q . Jelikož je reduktivní, tak podle tvrzení 10 všechny komponenty rozkladu mají velikost 1. Jenže zároveň je Q souvislý. Tudíž se jedná o T_1 . □

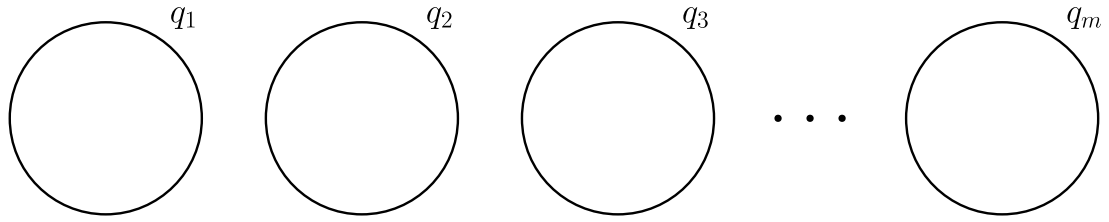
2.2 Barvení pomocí souvislých quandlů

V předchozí kapitole jsme si ukázali, že homomorfním obrazem fundamentálního quandle je souvislý quandle. Nyní naopak ukážeme, že pro každý netriviální souvislý quandle existuje takový uzel, který má netriviální obarvení. Na základě toho ukážeme, že quandle dává triviální obarvení pro všechny uzly, právě tehdy když je reduktivní.

Věta 12. *Pro každý souvislý quandle Q , $|Q| > 1$ existuje takový uzel K , že $\text{Col}_Q(K) > 0$.*

Důkaz. Pro důkaz této věty použijeme konstrukci, která se poprvé objevila v článku (Johnson, 1980), a kterou si upravíme tak, aby řešila náš problém. Konstrukce je následující:

Nejprve uvažujme orientovaný m -link, kde $m = |Q|$, viz obrázek 2.2. Každou komponentu obarvíme jiným prvkem z Q . Následně budeme postupně propojovat jednotlivé komponenty pomocí pásků tak dlouho, dokud nám nevznikne jediná komponenta, která bude uzel. Na konci dostaneme uzel, který bude mít netriviální obarvení, jelikož každá komponenta bude obarvena jiným prvkem z Q a



Obrázek 2.2: m -link

toto obarvení se v průběhu konstrukce zachovává. Z toho pak bude plynout, že $\text{Col}_Q(K) > 0$.

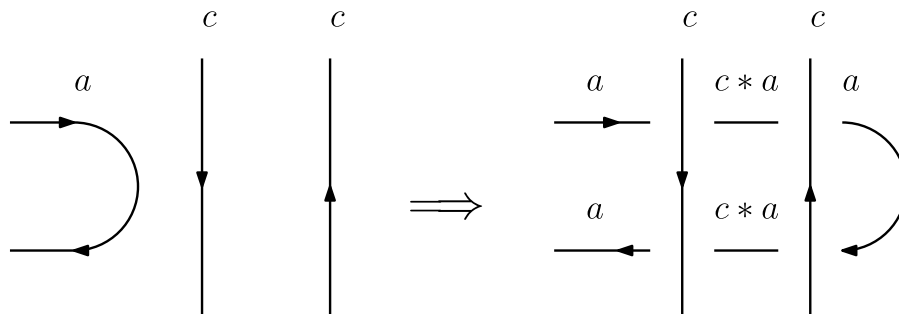
Mějme zadaný souvislý quandle Q . Jelikož je Q souvislý, pak podle lemmatu 3 existuje konečná posloupnost prvků $x_1, x_2, \dots, x_n \in Q$ taková, že

$$x_1 *^{\varepsilon_1} (x_2 *^{\varepsilon_2} (\dots *^{\varepsilon_{n-1}} (x_n *^{\varepsilon_n} a)) \dots) = b,$$

pro každé dva prvky $a, b \in Q$. Naším cílem bude postupně provádět levé translace $L_{x_1}^{\varepsilon_1}, L_{x_2}^{\varepsilon_2}, \dots, L_{x_n}^{\varepsilon_n}$ tak, abychom na konci mohli propojit dvě komponenty uzlu a získat tak link o $m - 1$ komponentách. Tento postup budeme opakovat tak dlouho, dokud nedostaneme uzal.

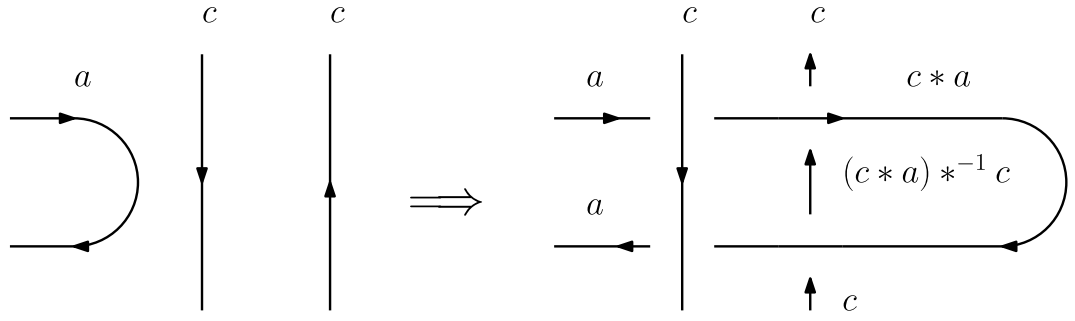
Začneme s komponentou obarvenou prvkem a . Z ní povedeme pásek. Pokud pásek bude křížovat s nějakou jinou komponentou, tak budeme postupovat podle jedné z následujících situací:

- 1) Pokud se pásek kříží s komponentou obarvenou prvkem $c \neq x_1$ pak pásek povedeme pod celou komponentou. Dojde tedy k situaci na obrázku 2.3. Tedy pásek povedeme pod celou komponentou, aniž bychom změnili obarvení konce pásku i komponenty.

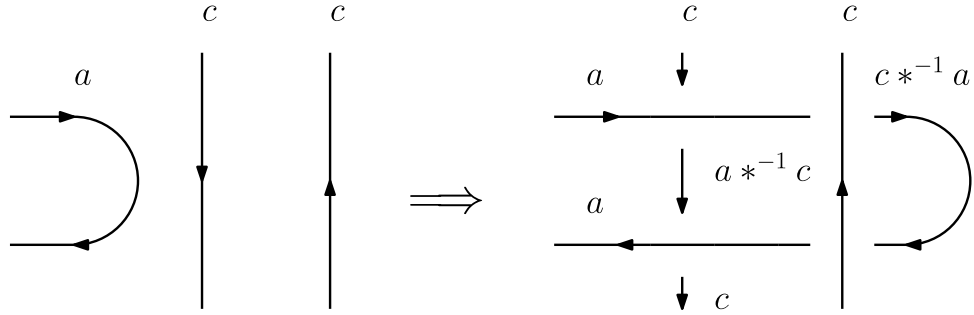


Obrázek 2.3: Pásek pod komponentou

- 2) Pokud se pásek kříží s komponentou obarvenou prvkem $c = x_1$ a platí, že $\varepsilon_1 = 1$, pak pásek provlékneme skrz tuto komponentu způsobem jako na obrázku 2.4. Konec pásku bude obarvený prvkem $x_1 * a$, zatímco komponenta obarvená prvkem x_1 zůstane nezměněná.
- 3) Pokud se pásek kříží s komponentou obarvenou prvkem $c = x_1$ a platí, že $\varepsilon_1 = -1$, pak pásek provlékneme skrz tuto komponentu způsobem jako na obrázku 2.5. Konec pásku bude obarvený prvkem $x_1 *^{-1} a$, zatímco komponenta obarvená prvkem x_1 zůstane nezměněná.



Obrázek 2.4: $x_1 * a$



Obrázek 2.5: $x_1 *^{-1} a$

Tento způsob budeme opakovat pro konec pásku tak dlouho, dokud konec pásku nebude obarvený prvkem b . Jelikož je posloupnost x_1, x_2, \dots, x_n konečná, tak k němu opravdu dojdeme. Následně pásek připojíme na komponentu obarvenou prvkem b a tím získáme link o $m - 1$ komponentách.

Počet komponent je konečný a jednou iterací algoritmu jsme snížili počet komponent o jedna. Algoritmus budeme tedy opakovat tak dlouho, dokud nedostaneme uzel. Takový uzel nazývá *stuhový uzel* (anglicky *ribbon knot*). Jelikož jsme každou komponentu $|Q|$ -linku obarvili jiným prvkem z Q a algoritmus toto obarvení zachovává, dostaneme uzel, který bude mít netriviální obarvení. Tedy $\text{Col}_Q(K) > 0$.

□

Příklad. Nyní provedeme konstrukci pro Foxův quandle F . Víme, že $2 * 1 = 3$ a $1 * 2 = 3$. Nejprve propojíme komponenty 1 a 3, následně připojíme zbývající komponentu 2 a dostaneme stuhový uzel R_F jako na obrázku 2.6.

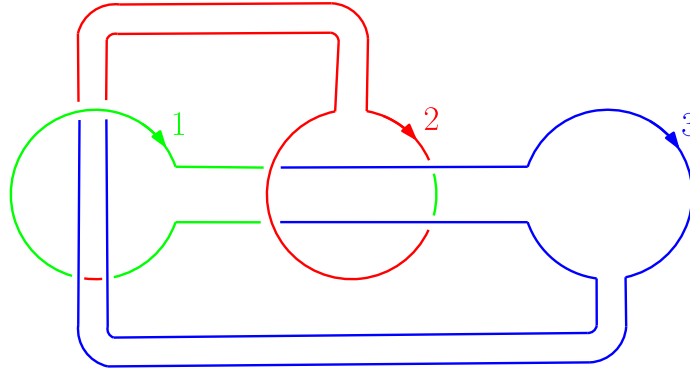
2.3 Barvení pomocí reduktivních quandlů

Nyní už přistoupíme k samotnému důkazu (1) \iff (3) z věty 1.

Věta 13. *Mějme konečný quandle Q . Pak platí jsou následující tvrzení ekvivalentní:*

1) $\text{Col}_Q(K)$ je konstantní,

2) Q je reduktivní.



Obrázek 2.6: Stuhový uzel pro Foxův quandle

Důkaz. Pokud je Q souvislý a netriviální, pak podle věty 12 zkonstruujeme příslušný stuhový uzel R tak, že bude mít netriviální obarvení $\text{Col}_Q(R) > 0$. Zároveň lze unknot U obarvit pouze triviálně, tedy $\text{Col}_Q(U) = 0$. Tedy $\text{Col}_Q(K)$ není konstantní.

(1) \implies (2):

Tuto implikaci ukážeme obměnou. Předpokládáme, že Q není reduktivní. Q se podle věty 5 rozkládá na komponenty (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) . Jelikož Q není reduktivní, pak podle tvrzení 10 víme, že existuje komponenta Q_i taková, že $|Q_i| > 1$. Označme si Q_i jako W . Podle věty 12 platí, že $\text{Col}_W(K) > 0$. Jelikož $W \preceq Q$, tak podle lemmatu 8 platí, že $\text{Col}_Q(K) \geq \text{Col}_W(K) > 0$. A tedy není konstantní.

(2) \implies (1):

Jestliže Q je reduktivní, pak dle věty 10 platí, že všechny komponenty jsou izomorfní T_1 . Z věty 6 plyne, že $\text{Col}_Q(K) = 0$, a tudíž $\text{Col}_Q(K)$ je konstantní pro všechny uzly K .

□

3. Quandlové barvení jako Vassilievův invariant

V této kapitole ukážu další charakterizaci reduktivních quandlů a to pomocí Vassilievových invariantů. Nejprve je ovšem uvést několik základních výsledků z teorie copánkových grup, které následně budou aplikovány v příslušném důkazu.

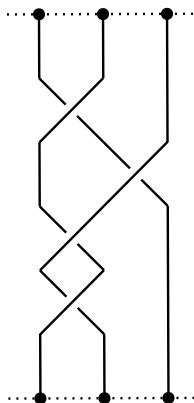
3.1 Copánkový index

Copánkovou grupu jako první zavedl Emil Artin v roce 1925. Copánky se skládají z n pramenů, které jsou upevněny k horní a dolní desce a mohou se mezi sebou křížit ve smyslu Reidemeistrových pohybů 2 a 3. My si zavedeme copánkovou grupu pomocí prezentace.

Definice 15. Buď zadané číslo n . Pak B_n značí grupu danou prezentací $B_n = \langle \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n-1} \mid \sigma_i \sigma_{i+1} \sigma_i = \sigma_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1}; \sigma_i \sigma_j = \sigma_j \sigma_i \rangle$, kde v první sadě relací $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ a ve druhé $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}; |i-j| \geq 2$.

První relace je ekvivalentem Reidemeistrova pohybu 3 a druhá relace říká, že pokud jsou příslušné prameny disjunktní, tak se mohou prohazovat.

Skládání $a \cdot b$ funguje geometricky tak, že se vezme spodní deska z a a přilepí se k horní desce b tak, aby na sebe navazovaly příslušné prameny, a pak se prostřední deska odstraní. Jednotkový prvek je copánek bez křížení. Inverzní prvek je symetrické překlopení copánku. Vlastně tak odpovídá Reidemeistrovu pohybu 2.

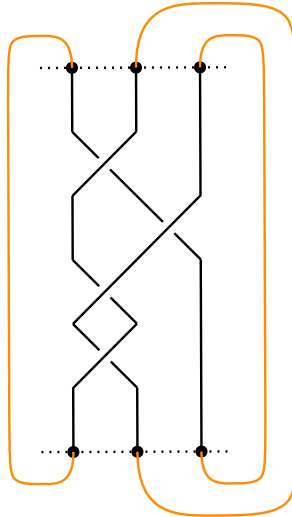


Obrázek 3.1: Příklad copánku

Pokud vezmeme nějaký copánek $b \in B_n$, pak můžeme udělat tzv. *uzávěr*, kdy dojde ke slepení horní a spodní desky tak, že se přilepí k sobě protilehlé prameny. Tímto obecně dostaneme link. Budeme ho značit K_b .

Jedna z nejnámějších vět z teorie uzlů je Alexanderova věta, která říká, že každý uzel lze získat jako závěr nějakého copánku.

Tvrzení 14 (Alexander, 1923). *Pro každý uzel K existuje číslo $n \in \mathbb{N}$ a copánek $b \in B_n$, že K je ekvivalentní závěru K_b .*



Obrázek 3.2: Lepení copánku

Předchozí větu lze použít k definici nového invariantu, a to copánkového indexu. Tento index nám říká, kolik pramenů potřebujeme, abychom mohli dostat daný uzel jako uzávěr copánku s daným počtem pramenů.

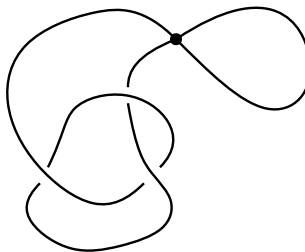
Definice 16. Pro daný uzel K rozumíme *copánkovým indexem* $br(K)$ (anglicky *braid index*) nejmenší číslo n takové, že existuje $b \in B_n$ tak, aby K byl ekvivalentní uzávěru K_b .

Pozorování. Copánkové číslo $br(K)$ je invariant.

3.2 Vassilievovy invarianty

Myšlenka Vassilievových invariantů stojí na zobecnění uzlů na tzv. singulární uzly. Tyto uzly se vyznačují tím, že dovolujeme křivce, aby protínala samu sebe. V této kapitole vycházíme z knížky (Chmutov a kol., 2011).

Definice 17. *Singulárním bodem* rozumíme bod, kde křivka protíná sama sebe právě 2 částmi křivky. *Singulárním uzlem* K^\bullet rozumíme uzel, který obsahuje alespoň jeden singulární bod.

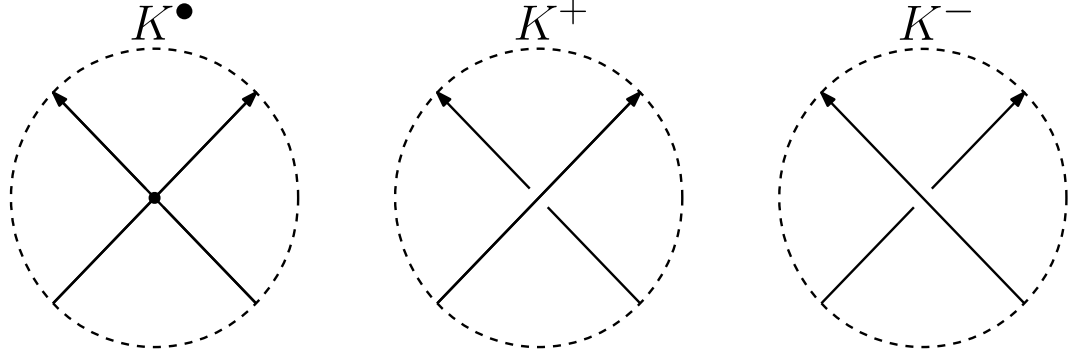


Obrázek 3.3: Singulární uzel s 1 singulárním bodem

Vassilievové invarianty se zavádí pomocí skein relace. Myšlenka je založena na tom, že invariant pro klasické uzly můžeme rozšířit na třídu singulárních uzlů. Dělá se to pomocí skein relace, kdy si zafixujeme singulární bod pro K^\bullet a lokálně

ho nahradíme kladným (K^+), resp. negativním (K^-) křížením. Následně získáme hodnotu invariantu v pro K^\bullet pomocí hodnot invariantů pro K^+ a K^- :

$$v(K^\bullet) = v(K^+) - v(K^-).$$



Obrázek 3.4: Vassilievova skein relace

Tato hodnota je jednoznačně určená, tudíž nám dává způsob, jak definovat invariant pro singulární uzly. Pokud má uzel K^\bullet singulární bodů více, tak postupujeme induktivně, očíslovujeme jednotlivé singulární body a dostaneme tak *úplnou rezoluci*:

$$v(K^\bullet) = \sum_{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \in \{+, -\}} (-1)^{|\varepsilon|} v(K^{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n}),$$

kde $|\varepsilon|$ značí počet záporných znamének v n -tici $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ a $K^{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n}$ značí uzly, které vzniknou nahrazením singulárních bodů křížením s orientací podle příslušného znaménka.

Myšlenka Vassilievových invariantů je, že tento vztah můžeme obrátit a říct, že definujeme invariant v tak, aby od určitého počtu singulárních bodů byl nulový.

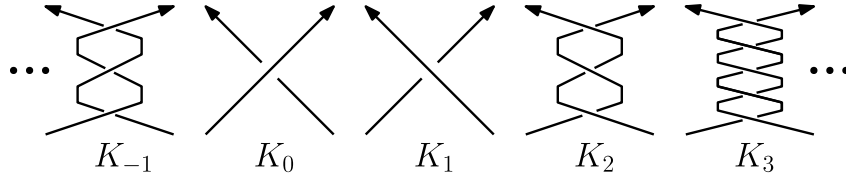
Definice 18. Invariant v se nazývá *Vassilievův*, nebo také *konečného typu* stupně $\leq m$, pokud platí, že pro každý singulární uzel K^\bullet s počtem průtnutí $> m$ platí $v(K^\bullet) = 0$. Řekneme, že je stupně m , pokud je stupně $\leq m$, ale není stupně $\leq m - 1$.

Spousta známých invariantů jsou Vassilievovy invarianty, nebo se na ně dají převést. Ovšem existují příklady invariantů, které nejsou Vassilievovy. Jeden takový je třeba copánkový index. Důkaz provedeme pomocí sekvence tzv. *twistů* zmíněných v článcích (Trapp, 1994) a (Dean, 1994).

Definice 19. Buď K uzel, pro který zafixujeme jedno křížení, a $z \in \mathbb{Z}$. Pak *twist* K_z je uzel, který vznikne z K tak, že lokálně nahradíme zafixované křížení křížením s z závitů jako na obrázku 3.5.

Tvrzení 15 (Trapp, 1994). *Buď $\{K_z : z \in \mathbb{Z}\}$ posloupnost twistů. Pokud je invariant $v : \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{C}$ Vassilievův stupně nejvýše m , tak platí, že $v(K_z)$ je polynom v z stupně nejvýše m .*

Nyní využijeme pár lemmat z článku (Eisermann, 1999), které nám pomohou ukázat, že copánkový index není Vassilievův invariant.



Obrázek 3.5: Twist uzlu

Důsledek 16. *Pokud je invariant v omezený na posloupnost twistů, tak je konstantní.*

Důkaz. Mějme invariant v Vassilievova stupně nejvýše m . Podle věty 15 platí, že $v(K_z)$ tvoří polynom v z stupně nejvýše m . Jelikož je v také omezený, tak to znamená, že tento polynom je konstantní. Dále, jelikož je součástí posloupnosti twistů uzly $K_0 = K$ i K_1 , kde dochází ke změně orientace křížení, tak $v(K) = v(K_0) = v(K_1) = v(K)$. Jelikož jsme schopni změnou orientace křížení dostat unknot, tak v musí být nutně konstantní. □

Lemma 17. *Copánkové číslo $br(K)$ je omezené na posloupnost twistů.*

Důkaz. Mějme uzel K a jeho copánkový index $br(K)$. Pak si vezměme z věty 14 copánek $b \in B_{br(K)}$ tak, že K je ekvivalentní uzávěru K_b . Nyní si zafixujeme jedno křížení a budeme provádět twisty. Twisty shora pak tedy dávají horní mez na copánkové číslo K_z . Zároveň platí, že $br(K) > 0$. Tedy $br(K)$ je omezené na posloupnost twistů. □

Tvrzení 18 (Eisermann, 1999). *Bud $br(K)$ copánkový index uzlu K . Pak pokud invariant $v : \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{C}$ splňuje, že $|v(K)| \leq f(br(K))$ pro nějakou funkci $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ a pro všechny uzly $K \in \mathcal{K}$, pak v není Vassilievův invariant, nebo je konstantní.*

Důkaz. Jelikož je copánkový index omezený na posloupnost twistů dle lemmatu 17 a zároveň dokážeme omezit hodnotu invariantu pomocí funkce f , tak podle věty 16 je invariant v konstantní, nebo není Vassilievův invariant. □

3.3 Charakterizace Vassilievových barvení uzlů

Nyní využijeme znalosti z předchozí podkapitoly o copánkovém indexu. Zatímco v článku (Eisermann, 1999) se autor zabývá grupovými homomorfismy, my jeho výsledek zobecníme na quandleové barvení. Abychom ukázali, že se jedná o obecnější výsledek, tak si všimněme, že Foxovo barvení nelze dostat jako $\text{Conj}(G)$ pro nějakou grupu G . Pokud ano, tak by grupa G byla velikosti 3, jenže jediná grupa velikosti 3 je cyklická grupa \mathbb{Z}_3 , která je abelovská. Jenže $\text{Conj}(\mathbb{Z}_3)$ je triviální quandle $T_{\mathbb{Z}_3}$, což není Foxovo barvení. Tedy jsme získali silnější výsledek, než který je v původním článku.

Věta 19. *Pro každý quandle Q platí, že počet obarvení $\text{Col}_Q(K)$ není Vassilievův invariant, nebo je konstantní.*

Důkaz. Mějme fixně zadaný quandle Q . Uvažujme libovolný uzel K a copánek $b \in B_{br(K)}$, kde $K_b \cong K$. Pak platí, že máme-li konkrétní obarvení $f \in \text{Hom}(Q_K, Q)$, tak je jednoznačně určeno obarvením konců provázků v copánkové reprezentaci. Tedy platí, že $\text{Col}_Q(K)$ dokážeme omezit tak, že každému konci přiřadíme nějaký prvek z Q . Tedy

$$\text{Col}_Q(K) \leq |Q|^{br(K)}.$$

Použitím věty 18 dostáváme, že $\text{Col}_Q(K)$ není Vassilievův invariant, nebo je konstantní. □

Z toho už nám plyne důkaz ekvivalence druhého a třetího tvrzení z věty 1.

Důsledek 20. *Mějme quandle Q . Pak platí, že je $\text{Col}_Q(K)$ Vassilievův invariant, právě tehdy, když Q je redukativní.*

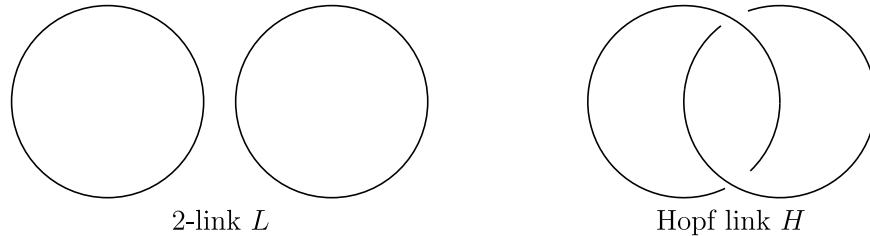
Důkaz. Z věty 13 plyne, že $\text{Col}_Q(K)$ je konstantní, právě tehdy když Q je redukativní. Z věty 19 plyne, že $\text{Col}_Q(K)$ je Vassilievův invariant, právě tehdy když je konstantní. Tedy obě tvrzení jsou ekvivalentní. □

3.4 Charakterizace Vassilievových barvení linků

Obdobnou charakterizaci můžeme získat i pro linky. Ovšem, v tomto případě bude vše jednodušší. Ukáže se totiž, že aby bylo $\text{Col}_Q(L)$ Vassilievův invariant, tak musí být Q triviální quandle. Nejprve je ovšem třeba dodefinovat $\text{Col}_Q(L)$ pro linky. Zatímco u uzlů jsme odebírali pouze $|Q|$ triviálních obarvení, tak u linků musíme zahrnout existenci více komponent. Jako obdobu unknotu budeme brát m -link jako na obrázku 2.2.

Definice 20. Buď Q quandle a L link. Definujeme $\text{Col}_Q(L) = |\text{Hom}((,Q)_L, Q)| - |Q|^{c(L)}$, kde $c(L)$ značí počet komponent linku L .

Věta 21. *Uvažujme quandle Q a link L s alespoň 2 komponentami. Pak platí, že $\text{Col}_Q(L)$ není Vassilievův invariant, nebo je konstantní. Navíc $\text{Col}_Q(L)$ je konstantní, právě tehdy když Q je triviální quandle.*



Obrázek 3.6: 2-link a hopf link

Důkaz. První část je jen variací věty 19, kde místo uzlu uvažujeme link.

Dále, pokud je Q triviální quandle, tak platí, že $\text{Col}_Q(L) = 0$ pro všechny linky L . Tedy $\text{Col}_Q(L)$ je konstantní.

Naopak uvažujme quandle Q , který není triviální. Pak jako L označíme 2-link a jako H hopf link, jako na obrázku 3.6.

Pro L platí, že $\text{Col}_Q(L) = 0$ pro všechny quandle Q .

Jelikož Q není triviální, tak existuje dvojice prvků $a, b \in Q$ taková, že $a \neq b$ a $a * b \neq b$. Pokud obarvíme H tak, že první komponentu obarvíme prvkem a a druhou komponentu obarvíme prvkem b , tak ze vztahu výše plyne, že H nejde touto dvojicí prvků obarvit. Tedy $\text{Col}_Q(L) < 0$ a $\text{Col}_Q(L)$ není konstantní. □

Seznam použité literatury

- ALEXANDER, J. W. (1923). A lemma on systems of knotted curves. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **9**(3), 93–95. ISSN 00278424. URL <http://www.jstor.org/stable/84367>.
- BONATTO, M., CRANS, A., NASYBULLOV, T. a WHITNEY, G. (2021). Quandles with orbit series conditions. *Journal of Algebra*, **567**, 284–309. ISSN 0021-8693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jalgebra.2020.09.026>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021869320304932>.
- BONATTO, M. a STANOVSKÝ, D. (2021). A universal algebraic approach to rack coverings.
- BONATTO, M., CRANS, A. S. a WHITNEY, G. (2019). On the structure of hom quandles. *Journal of Pure and Applied Algebra*, **223**(11), 5017–5029. ISSN 0022-4049. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpaa.2019.03.006>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022404919300696>.
- CHMUTOV, S., DUZHIN, S. a MOSTOVOY, J. (2011). *Introduction to Vassiliev Knot Invariants*. Cambridge University Press.
- CROWELL, R. a FOX, R. (1963). *Introduction to Knot Theory*. Introductions to higher mathematics. Ginn. ISBN 9780598273888. URL <https://books.google.cz/books?id=U1HvAAAAMAAJ>.
- DEAN, J. (1994). Many classical knot invariants are not Vassiliev invariants. *J. Knot Theory Ramifications*, **3**(1), 7–10. ISSN 0218-2165,1793-6527. doi: [10.1142/S0218216594000034](https://doi.org/10.1142/S0218216594000034). URL <https://doi.org/10.1142/S0218216594000034>.
- EHRMAN, G., GURPINAR, A., THIBAUT, M. a YETTER, D. (2006). Toward a classification of finite quandles. *Journal of Knot Theory and its Ramifications*, **17**. doi: [10.1142/S0218216508006270](https://doi.org/10.1142/S0218216508006270).
- EISERMANN, M. (1999). The number of knot group representations is not a vassiliev invariant. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16945432>.
- HAKEN, W. (1962). Über das homöomorphieproblem der 3-mannigfaltigkeiten. i. *Mathematische Zeitschrift*, **80**(1), 89–120. ISSN 0025-5874.
- HASS, J., LAGARIAS, J. C. a PIPPENGER, N. (1998). The computational complexity of knot and link problems.
- JEDLIČKA, P., PILITOWSKA, A. a ZAMOJSKA-DZIENIO, A. (2020). Distributive biracks and solutions of the yang–baxter equation. *International Journal of Algebra and Computation*, **30**(03), 667–683. ISSN 1793-6500. doi: [10.1142/s0218196720500150](https://doi.org/10.1142/s0218196720500150). URL <http://dx.doi.org/10.1142/S0218196720500150>.

- JEŽEK, J. (2008). *Universal Algebra*. URL <https://ka.karlin.mff.cuni.cz/jezek/ua.pdf>.
- JOHNSON, D. (1980). Homomorphs of knot groups. *Proceedings of the American Mathematical Society*, **78**(1), 135–138. ISSN 00029939, 10886826. URL <http://www.jstor.org/stable/2043056>.
- JOYCE, D. (1982). A classifying invariant of knots, the knot quandle. *Journal of Pure and Applied Algebra*, **23**, 37–65. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120011159>.
- KUPERBERG, G. (2014). Knottedness is in np, modulo grh. *Advances in mathematics (New York. 1965)*, **256**, 493–506. ISSN 0001-8708.
- MURASUGI, K. (1996). *Fundamental Concepts of Knot Theory*, pages 5–24. Birkhäuser Boston, Boston, MA. ISBN 978-0-8176-4719-3. doi: 10.1007/978-0-8176-4719-3_2. URL https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4719-3_2.
- TRAPP, R. (1994). Twist sequences and Vassiliev invariants. volume 3, pages 391–405. doi: 10.1142/S0218216594000289. URL <https://doi.org/10.1142/S0218216594000289>. Random knotting and linking (Vancouver, BC, 1993).