

PŘÍLOHA 4

DIAGNOSTICKÝ PRŮZKUM ŽELEZNIČNÍHO MOSTU POD VYŠEHRADEM
SO 20-20-05 ŽEL. M. V EV. KM 3,706, VÝTOŇ

KOROZNÍ ANALÝZA

ÚVOD

V této příloze jsou shrnuty výsledky korozního průzkumu ocelové nosné konstrukce mostu pod Vyšehradem. Podkapitoly této přílohy jsou – výsledky vizuální charakterizace korozního poškození (1.), analýza korozních produktů (2.), normativní predikce následného rovnoměrného korozního poškození (3.).

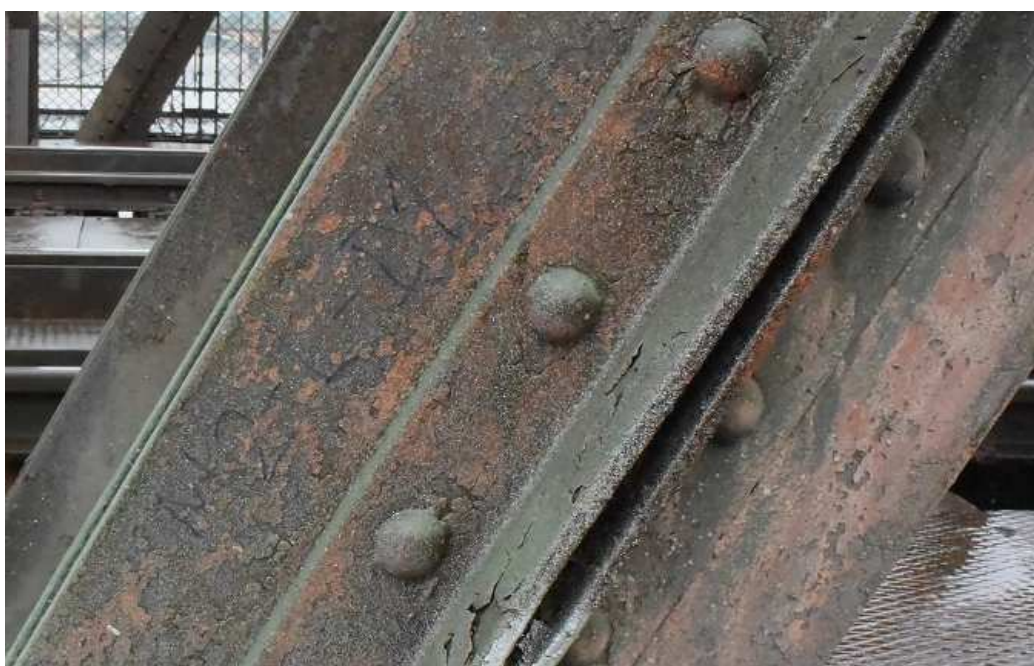
1. Výsledky vizuální charakterizace korozního poškození

Dne 3. 9. 2018 byl realizován korozní průzkum ocelové nosné konstrukce mostu pod Vyšehradem (**Obr. 1.**). Korozní průzkum zahrnoval dokumentaci typického korozního poškození jednotlivých prvků nýtované ocelové nosné konstrukce.



Obr. 1. Pohled na levou stranu pole NK1 ocelové konstrukce mostu pod Vyšehradem, kde byla v době odběru osazena stavební lávka umožňující přístup k běžně nedostupným částem nosné konstrukce (spodní pás)

Průzkum byl v první fázi zaměřen na skladbu ochranných organických povlaků - nátěrů (**Obr. 2. – Obr. 4.**). Na základě vizuální kontroly lze konstatovat, že ochranné souvrství povlaků je převážně kompletně poškozené, tedy zcela bez ochranného (bariérového) účinku. Zřejmá je až poslední fáze korozního poškození, tj. odprýskávání souvrství nátěru. V oblastech lokalizovaného zachování zbytků nátěrového systému je zřejmé jeho významné podkorodování a tvorba korozních puchýřů, lze dohledat místa i s delaminací vrstvy nátěrového systému. Z vizuální kontroly šupin nátěrového systému je patrné, že během doby provozu mostu docházelo k renovaci ochranného povlaku (přetírání). V některých místech se vyskytují i čtyři vrstvy nátěru, na dalších místech jsou evidentně provedeny pouze dva nátěry. Je tedy zřejmé, že renovace nátěrů měla lokální charakter. Z fragmentů nátěrového systému lze určit, že původní nátěr byl na suříkové bázi (Pb_3O_4 – minium, od padesátých let minulého století se nepoužívá jako inhibitor koroze oceli v základním nátěru kvůli toxicitě olova).



Obr. 2. Příklad kompletního odprýskání systému protikorozních povlaků na vnějším povrchu diagonály – je zřejmé, že původní základní nátěr byl na suříkové bázi



Obr. 3. Další příklad kompletního odprýskání systému protikorozních povlaků na povrchu ocelového profilu – dobře zřejmá suříková základní nátěrová hmota



Obr. 4. Ukázka zachovalých fragmentů původního základního nátěru na suříkové bázi na vnitřních stěnách profilů

Na mnoha místech ocelové konstrukce jsou zřejmé úsady tvořené především odprýsknutými korozními produkty, v menším podílu pak zbytky nátěrového systému, prachem, exkrementy ptáků a zbytky z jejich hnízdění. V uzavřených prostorech zejména dolního pasu nosné konstrukce byl zjištěn i antropogenní odpad (především obaly). Největší podíl úsad z korozních produktů a zbytků nátěrového systému je zřejmý na dolním pase a spodní přírubě (**Obr. 5.**). Tato místa jsou zejména v místech napojení svislic a diagonál k dolnímu pasu významně poškozena korozním napadením (mechanismus koroze pod úsadami).



Obr. 5. Korozní úbytky a oslabení v místech napojení dolního pasu a koncové svislice vlivem koroze pod úsadami



Obr. 6. Korozní oslabení krčních úhelníků dolního pasu vlivem koroze pod vrstvou úsad (korozních produktů a nečistot)

Nejzávažnější poruchy ocelové nosné konstrukce mostu pod Vyšehradem představují lokální poškození vlivem koroze pod úsadami (významné lokální redukce tloušťky - oslabení a redukce profilů v celé tloušťce - úbytky). Úsady podporují korozi zadržováním vody (srážková; nadkritická vlhkost) a rovněž podporují činnost článků s diferenční aerací (koncentrační článek s rozdílným ovzdušněním). Typické snímky diskutovaného poškození jsou vyobrazeny na **Obr. 7.** – **Obr. 10.** Tato korozní poškození vykazují velkou četnost a na mnoha místech byla zřejmá přítomnost úsad i v době provádění korozního průzkumu.



Obr. 7. Korozní úbytky v místech napojení svislic ke spodnímu pasu vlivem koroze pod úsadami (nečistoty a odprýsknuté korozní produkty)



Obr. 8. Korozní úbytky ocelových profilů v místě napojení koncové svislice k dolnímu pasu vlivem koroze pod úsadami



Obr. 9. Korozní úbytek přes celou šířku pásnice svislice v místě napojení ke spodnímu pasu vlivem koroze pod úsadami (nečistoty a odprýsknuté korozní produkty)



Obr. 10. Perforace v profilech diagonály vyvolaná lokalizovanou formou korozního poškození – odkorodování nýtového spoje vlivem štěrbinové koroze

U členěných průřezů svislic a diagonál dochází v důsledku činnosti mechanismu štěrbinové koroze k trvalé plastické deformaci průřezu – rozevírání přírub v důsledku tvorby expanzních korozních produktů (**Obr. 11. – Obr. 13.**). Korozní produkty v této oblasti jsou silně vrstevnaté a kontaminované nečistotami. V některých případech dochází již k odprýskávání expanzivních korozních produktů z těchto míst (**Obr. 13.**).



Obr. 11. Snímek dalšího z rozevíraných spojů vlivem odkorodování středního plochého vzorku s masivní tvorbou expanzivních korozních produktů

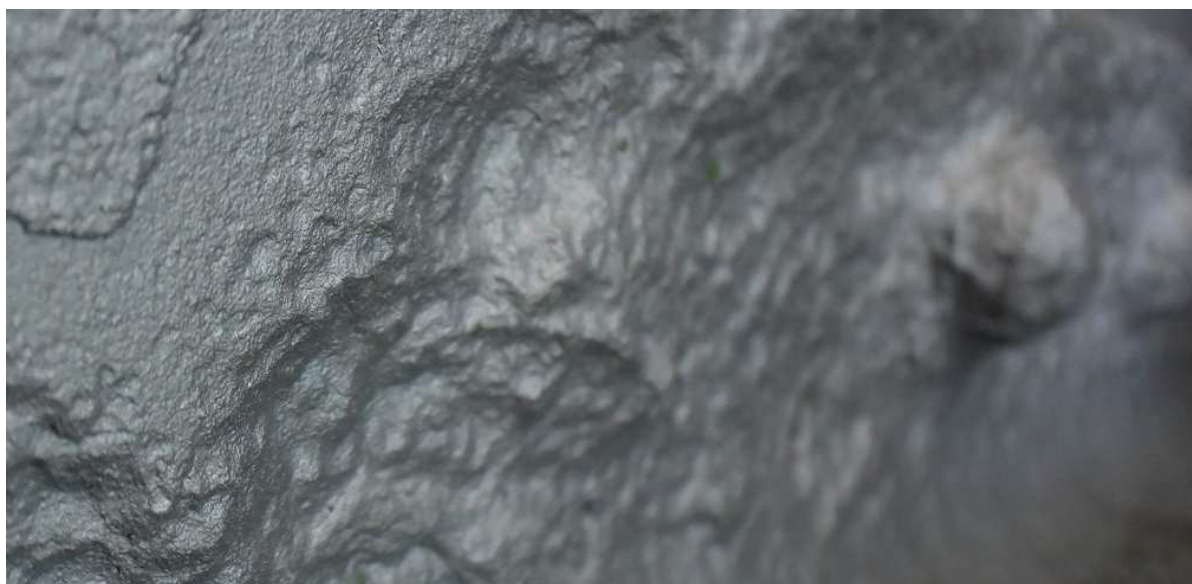


Obr. 12. Detail místa mezi nýtovanými spoji rozevřený vlivem expanzivních korozních produktů



Obr. 13. Rozevírání původně nýtovaných diagonálních profilů vlivem tvorby expanzivních korozních produktů

Významné korozní poškození bylo detekováno rovněž u spojovacích prostředků – nýtů (**Obr. 14.** a **Obr. 15.**). Na více místech je zřejmé působení štěrbinové koroze v oblasti mezi dříkem a hlavou nýtu, které v některých případech způsobila odkorodování hlavy nýtu.



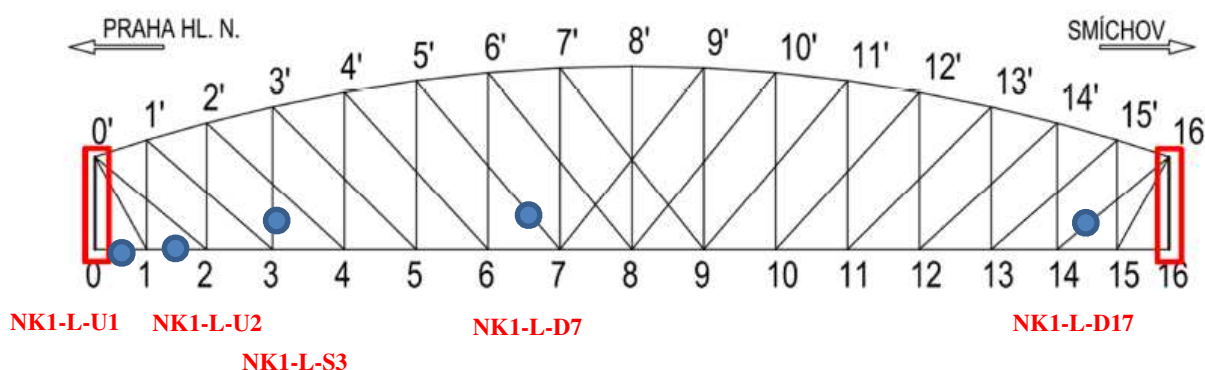
Obr. 14. Příklad korozního poškození nýtu – odkorodování hlavy nýtu vlivem lokalizovaného korozního poškození ve stojině dolního pasu



Obr. 15. Odpadnutí původního nýtu ve stojině dolního pasu vlivem štěrbinové koroze

2. Analýza korozních produktů

V rámci korozního průzkumu ze dne 3. 9. 2018 byl proveden odběr celkem 5 vzorků korozních produktů z různých typů prvků nosné konstrukce (souhrn lokalit odběru shrnují **Tab. 1. a Obr. 16**). U některých vzorků byla zřejmá kontaminace prašností z okolí již při odběru vzorku (**Tab. 1.**).



Obr. 16. Místa odběru korozních produktů pro korozní analýzu

Tab. 1. Lokalizace odběru korozních produktů – souhrnná tabulka

č. odběru	lokalizace na konstrukci	vzhled korozních produktů	poznámka
1	NK1-L-U1 (spodní příruba dolního pasu; vnitřní část)	hrubozrnné; nepřilnavé	kontaminace
2	NK1-L-U2 (spodní příruba dolního pasu; vnější část)	hrubozrnné; nepřilnavé	-
3	NK1-L-V3 (svislice, vnitřní část)	jemné; nepřilnavé	kontaminace
4	NK1-L-D7 (napojení diagonály; rozevřené místo)	hrubozrnné; nepřilnavé	-
5	NK1-L-D17 (diagonála; vnější povrch)	hrubozrnné; nepřilnavé	-

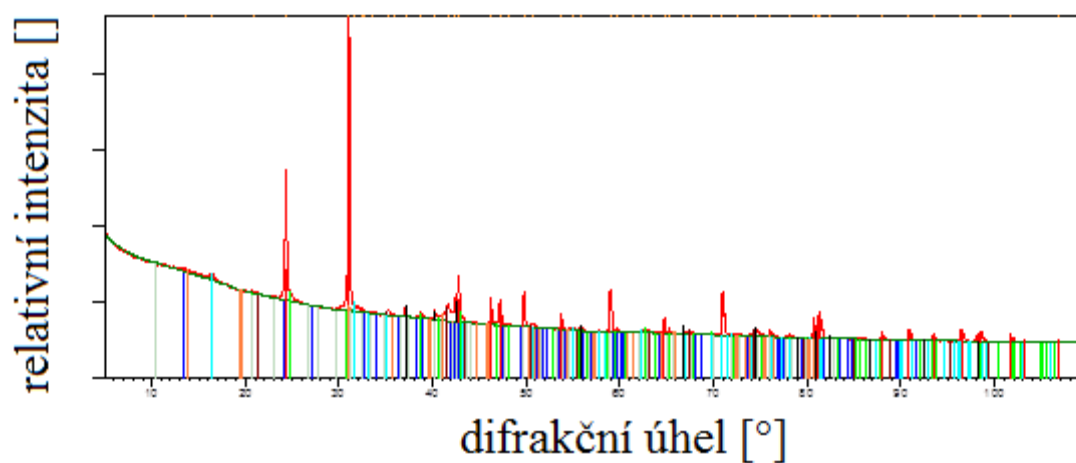
Odebrané vzorky byly čištěny promýváním ethanolem přes konvenční filtrační aparaturu. Po vysušení byly jednotlivé vzorky rozemlety (manuálně, třecí miska s tloučkem) a podrobeny prvkové XRF (rentgenová fluorescence) analýze a následně fázové XRD (rentgenová difrakce) analýze.



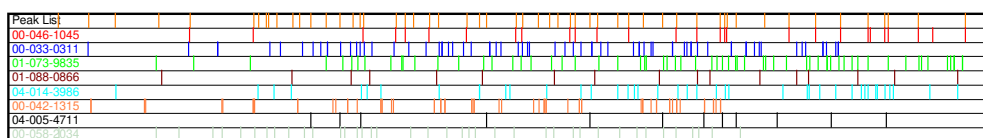
Obr. 17. Lokalizace místa odběru korozních produktů číslo 1 – NK1-L-U1

Tab. 2. Výsledky XRF prvkové analýzy složení korozních produktů z místa odběru 1 - NK1-L-U1

prvek	zastoupení [hm. %]
Na	0,34
K	0,42
Mg	0,19
Al	1,27
Si	46,63
Cl	0,75
Fe	41,09
Ba	0,61
Zn	4,82



Obr. 18. Difraktogram korozních produktů z místa odběru 1 NK1-L-U1



název	sumární vzorec	semiquant. zastoupení [hm. %]
křemen	SiO ₂	78
sádrovec	CaSO ₄ ·2H ₂ O	<1
muskovit	K _x Al _y Si _z O _p H _r	<1
oxid zinečnatý	ZnO	4
magnetit	Fe ₃ O ₄	3
lepidokrokit	γ-FeO(OH)	4
goetit	α-FeO(OH)	5
akaganeit	β-FeO(OH)	6

Obr. 19. Legenda k difraktogramu z Obr. 18.

Ke každému odběrovému místu (lokalizace 1-5 – Tab. 1.) byla provedena fotodokumentace (Obr. 17., Obr. 20., Obr. 23., Obr. 26., Obr. 29.). V textu jsou shrnuty výsledky XRF prvkové analýzy nejvýznamnějších zastoupených elementů v Tab. 2. – Tab. 6. Dále jsou pak na Obr. 18. a Obr. 19. (odběrové místo č. 1), Obr. 21. a Obr. 22. (odběrové místo č. 2), Obr. 24. a Obr. 25. (odběrové místo č. 3), Obr. 27. a Obr. 28. (odběrové místo č. 4), respektive Obr. 30. a Obr. 31. (odběrové místo č. 5) uvedeny výsledky XRD fázové analýzy.

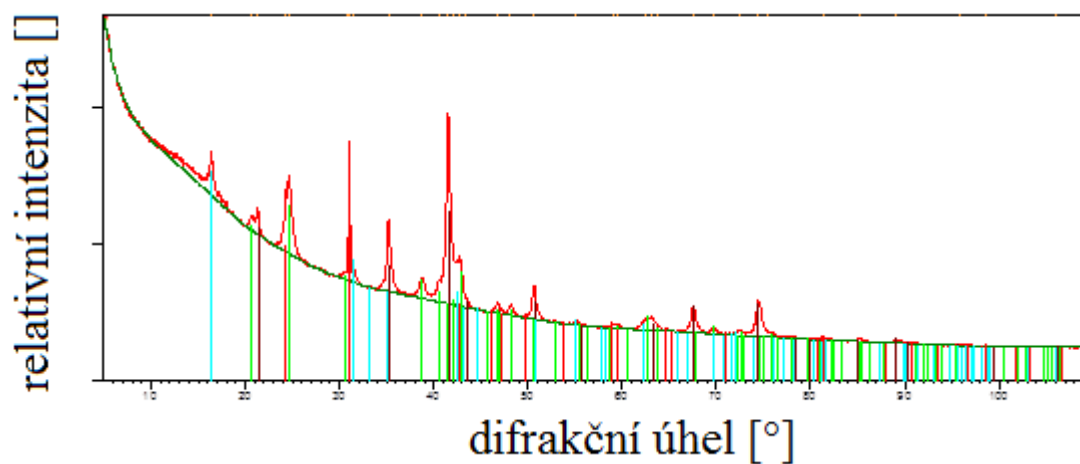
Z výsledků je zřejmé, že všechny vzorky ovšem různou měrou jsou kontaminovány prachovými částicemi (PM), nejvíce ovšem vzorky, které byly identifikovány jako kontaminované již vizuálně (vzorek č. 1 a vzorek č. 3). Zastoupení obsahu chloridových aniontů je jednoznačně pozad'ové (tj. zcela pozad'ová je i rychlost depozice chloridových aniontů). Pouze u prvního vzorku (vzorek č. 1 – dolní pásnice) je obsah chloridových aniontů významnější (0,75 hm. %) a v korozních produktech se objevuje fáze akaganeit. V tomto případě se zřejmě jedná o dlouhodobé usazeniny aeorosolu s malými částicemi PM10, které nesou chloridové aniony. Tímto byl prokázán intuitivní názor o minimálním ovlivnění korozního poškození této konstrukce vlivem chloridových aniontů (není zde prováděna zimní údržba s použitím rozmrazovacích solí).



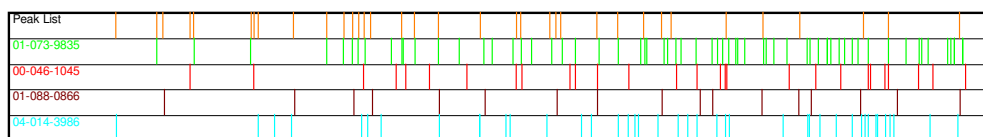
Obr. 20. Lokalizace místa odběru korozních produktů číslo 2 - NK1-L-U2

Tab. 3. Výsledky XRF prvkové analýzy složení korozních produktů z místa odběru 2 - NK1-L-U2

prvek	zastoupení [hm. %]
Na	-
K	0,01
Mg	0,18
Al	0,18
Si	5,48
Cl	0,03
Fe	93,41
Ba	-
Zn	0,22



Obr. 21. Difraktogram korozních produktů z místa odběru 2 - NK1-L-U2



název	sumární vzorec	semiquant. zastoupení [hm. %]
křemen	SiO ₂	24
magnetit	Fe ₃ O ₄	32
lepidokrokrit	γ-FeO(OH)	13
goetit	α-FeO(OH)	31

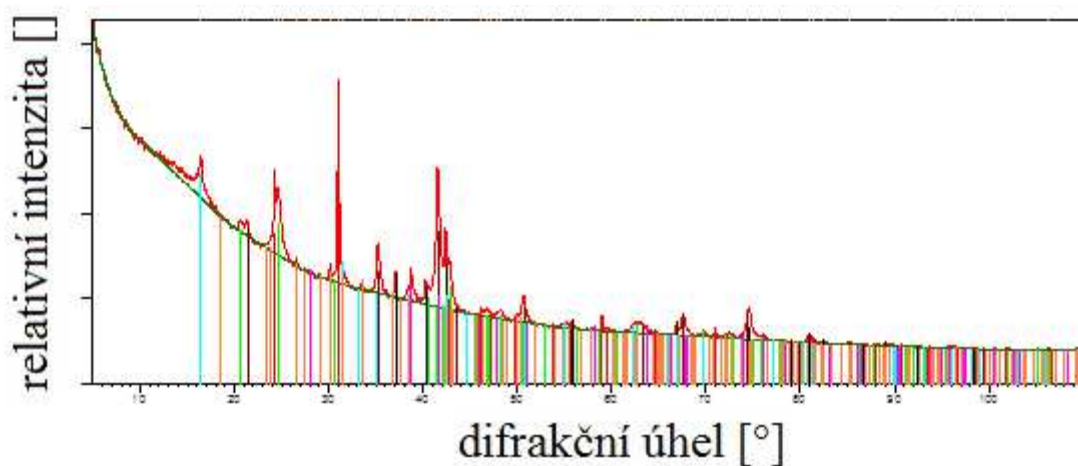
Obr. 22. Legenda k difraktogramu z **Obr. 21.**



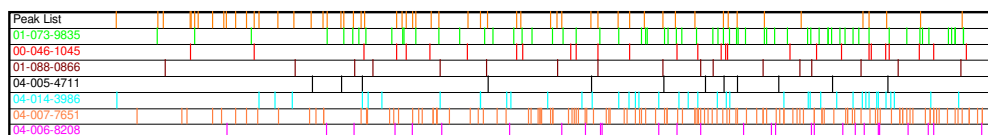
Obr. 23. Lokalizace místa odběru korozních produktů číslo 3 - NK1-L-V3

Tab. 4. Výsledky XRF prvkové analýzy složení korozních produktů z místa odběru 3 - NK1-L-V3

prvek	zastoupení [hm. %]
Na	0,07
K	0,14
Mg	0,26
Al	1,60
Si	10,35
Cl	0,03
Fe	75,73
Ba	1,51
Zn	7,94



Obr. 24. Difraktogram korozních produktů z místa odběru 3 - NK1-L-V3



název	sumární vzorec	semiquant. zastoupení [hm. %]
křemen	SiO ₂	41
magnetit	Fe ₃ O ₄	17
lepidokrokit	γ-FeO(OH)	9
goetit	α-FeO(OH)	14
oxid zinečnatý	ZnO	9
hematit	Fe ₂ O ₃	6
baryt	BaSO ₄	4

Obr. 25. Legenda k difraktogramu z Obr. 24.

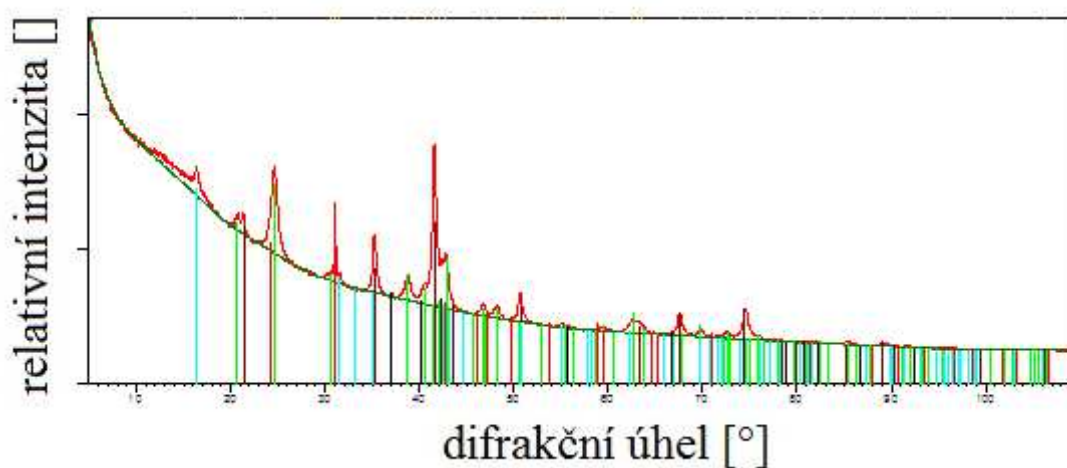


Obr. 26. Lokalizace místa odběru korozních produktů číslo 4 NK1-L-D7

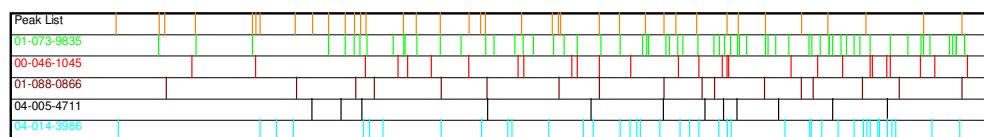
V korozních produktech všech vzorků jsou zastoupeny korozní fáze elektrochemické formy korozního poškození. S ohledem na zastoupení fází goetit a lepidokrokit je zřejmé, že na povrchu konstrukce dochází k pravidelnému střídání cyklů ovlhčení a osušení. Precipitace fáze magnetit (Fe_3O_4) ve velkém množství poukazuje na dlouhodobý proces korozního poškození. V korozních produktech byly detekovány fáze typické pro nátěrové systémy – konkrétně Pb_3O_4 (suřík, korozní inhibitor – evidentně ho obsahuje základní nátěr (původní)), dále pak oxid zinečnatý (ZnO , korozní inhibitor, bílý pigment, v některém z vrchních nátěrů) a BaSO_4 (plnivo, v některém z vrchních nátěrů). Je zřejmé, že konstrukce byla velmi pravděpodobně přetírána v průběhu desítek let. Aplikovány byly evidentně po anorganické stránce i stránce organické různé organické povlaky

Tab. 5. Výsledky XRF prvkové analýzy složení korozních produktů z místa odběru 4 - NK1-L-D7

prvek	zastoupení [hm. %]
Na	-
K	0,05
Mg	0,11
Al	0,73
Si	2,30
Cl	0,02
Fe	93,82
Ba	0,20
Zn	1,59



Obr. 27. Difraktogram korozních produktů z místa odběru 4 NK1-L-D7



název	sumární vzorec	semiquant. zastoupení [hm. %]
křemen	SiO ₂	29
magnetit	Fe ₃ O ₄	26
lepidokrokit	γ-FeO(OH)	4
goetit	α-FeO(OH)	38
oxid zinečnatý	ZnO	3

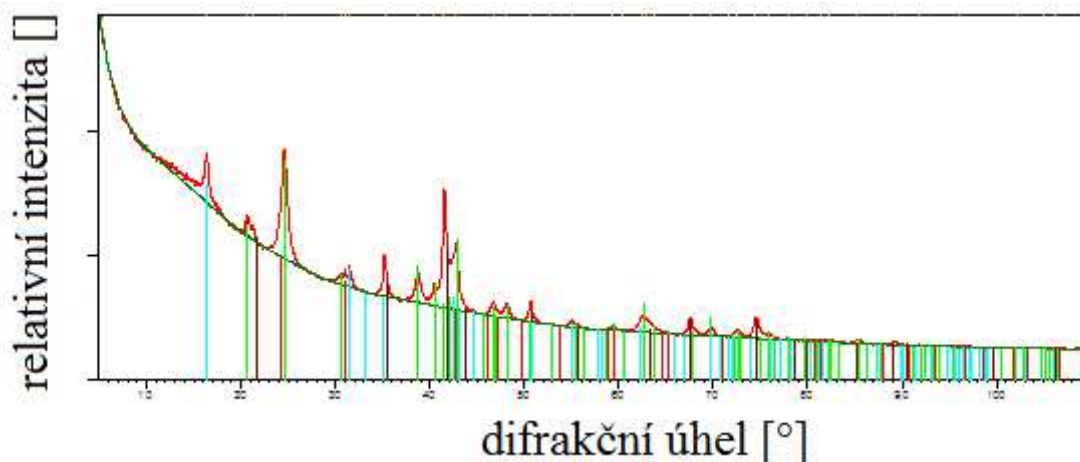
Obr. 28. Legenda k difraktogramu z **Obr. 27.**



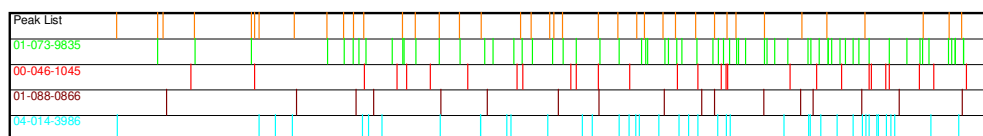
Obr. 29. Lokalizace místa odběru korozních produktů číslo 5 - NK1-L-D17

Tab. 6. Výsledky XRF prvkové analýzy složení korozních produktů z místa odběru 5 - NK1-L-D17

prvek	zastoupení [hm. %]
Na	-
K	0,01
Mg	0,04
Al	0,29
Si	0,78
Cl	0,02
Fe	97,40
Ba	0,01
Zn	0,50



Obr. 30. Difraktogram korozních produktů z místa odběru 5 - NK1-L-D17



název	sumární vzorec	semiquant. zastoupení [hm. %]
křemen	SiO ₂	3
magnetit	Fe ₃ O ₄	21
lepidokrokit	γ-FeO(OH)	11
goetit	α-FeO(OH)	64

Obr. 31. Legenda k difraktogramu z **Obr. 30.**

3. Normativní predikce následného rovnoměrného korozního poškození

V této části korozního průzkumu následuje normativní predikce úrovně původního korozního poškození (rovnoměrná forma) dle současně platných norem (ČSN ISO 9223:1992 – respektive ČSN EN ISO 9223, ČSN EN ISO 9224, ČSN EN ISO 12944/1-5). Numericky analyzována bude úroveň rovnoměrného korozního poškození (hloubka průniku) ocelové konstrukce s okrajovými podmínkami až do roku 2018 a dále bude normově predikováno následné korozní poškození. Okrajové podmínky pro zhodnocení úrovně korozního poškození zhodnocuje **Tab. 7**. V **Tab. 8** jsou uvedeny klimatické charakteristiky pro výpočet korozní rychlosti oceli po prvním roce (numerická rovnice – ČSN EN ISO 9223) expozice a v **Tab. 9** jsou uvedeny klimatické charakteristiky pro obdobný výpočet ovšem následného korozního poškození (pro celkovou dobu ovlhčení τ_4 , tj. $2500 \text{ h/a} < \tau \leq 5500$).

Tab. 7. Souhrnné zhodnocení okrajových podmínek pro numerickou analýzu

úroveň objektivnosti	charakteristika	poznámka
1.	rovnorné poškození	bez lokalizace
2.	nezohledňuje vliv náteru	-
3.	rychlost depozice Cl ⁻ nízká	vychází z kapitoly b)
4.	nezohledňuje vnitřní pnutí	-
5.	skladba oceli – st. uhlíková	-

Tab. 8. Klimatické charakteristiky pro výpočet korozní rychlosti oceli po prvním roce expozice (původní korozní poškození – 1901)

parametr	hodnota	jednotka	převzato
rychlost depozice SO ₂	35 P _c = 28 P _d	mg/(m ² ·d)	článek [9]
rychlost depozice Cl ⁻	3 (S ₀)	mg/(m ² ·d)	kapitola b)
průměrná teplota	8,2	°C	ČHMÚ (Obr. 32.)
průměrná RH	76,52	%	Area 2017 (Obr. 33.)

Tab. 9. Klimatické charakteristiky pro výpočet korozní rychlosti oceli po prvním roce expozice (následné korozní poškození – 2018)

parametr	hodnota	jednotka	převzato
rychlost depozice SO ₂	7 P _c = 5,6 P _d	mg/(m ² ·d)	článek [12]
rychlost depozice Cl ⁻	3 (S ₀ ; S _d)	mg/(m ² ·d)	kapitola b)
průměrná teplota	8,2	°C	ČHMÚ (Obr. 32.)
průměrná RH	76,52	%	Area 2017 (Obr. 33.)

Pro vlastní výpočet korozní rychlosti po prvním roce expozice lze využít rovnici 1, respektive rovnici 2 (ČSN EN ISO 9223).

$$r_{corr} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot \exp(0,020 \cdot RH + f_{St}) + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot \exp(0,033 \cdot RH + 0,040 \cdot T) \quad (\text{rovnice 1})$$

$$f_{St} = 0,150 \cdot (T - 10) \text{ pro } T \leq 10 \text{ } ^\circ\text{C}; \text{ jinak } - 0,054 \cdot (T - 10) \quad (\text{rovnice 2})$$

Po doplnění klimatických dat z **Tab. 8.** vychází 38,802 μm/1. rok expozice (původní korozní poškození - 1901), po doplnění klimatických dat z **Tab. 9.** vychází **18,785 μm/1. rok expozice** (následné korozní poškození – 2018).

Následně pro výpočet celkového poškození lze použít rovnici 3 z ČSN EN ISO 9224, zohledňující vliv skladby materiálu na tvorbu korozních produktů (zohlednění mírného vlivu bariérového účinku precipitovaných korozních produktů).

$$D = r_{\text{corr}} \cdot t^b \quad (\text{rovnice 3})$$

V rovnici 3 zastupují algebraické členy D – celkový průnik koroze (jedna strana), r_{corr} – počáteční hodnotu korozní rychlosti (korozní rychlost po prvním roce expozice), t – čas (v letech), b – koeficient složení oceli (lze predikovat hodnotu 0,85 – predikace na straně bezpečné). Po dosazení za $r_{\text{corr}} = 38,802$, $t = 117$ let (2018-1901) a $b = 0,85$, vychází celkové poškození ocelové nosné konstrukce mostu za 117 let jeho existence 2,22 mm/117 let (z jedné strany). Toto číslo nezohledňuje vliv systému organických povlaků, které byly použity jako protikorozní ochrana – reálné číslo by bylo nižší. Protože v současnosti není konstrukce chráněna organickým povlakem (pouze lokální málo účinná ochrana) lze očekávat korozní rychlost přibližně 19 $\mu\text{m}/\text{rok}$ (jedna strana konstrukce; nezohledňuje vliv částečné ochrany korozními produkty a diskutuje pouze rovnoměrné korozní poškození). S ohledem na vypočtenou korozní rychlost lze uvažovat korozní agresivity působící atmosféry C2/C3.

ÚZEMNÍ TEPLOTY
HOME

Územní teploty v roce 1961
Vysvětlivky:
T = teplota vzduchu [°C]
N = dlouhodobý normální teploty vzduchu 1961-1990 [°C]
O = odchylka od normálu [°C]

Kraj		Měsíc												Rok
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
Česká republika	T	-3,4	1,7	5,1	10,7	10,2	16,2	15,2	15,7	15,0	9,4	2,7	-3,2	7,9
	N	-2,8	-1,1	2,5	7,3	12,3	15,5	16,9	16,4	12,8	8,0	2,7	-1,0	7,5
	O	-0,6	2,8	2,6	3,4	-2,1	0,7	-1,7	-0,7	2,2	1,4	0,0	-2,2	0,4
	T	2,0	2,6	6,1	11,5	10,7	16,3	15,0	16,3	15,0	9,8	2,0	-2,2	8,6
Praha a Středočeský	N	-2,0	-0,4	3,4	8,1	13,0	16,3	17,8	17,2	13,6	8,6	3,3	-0,2	8,2
	O	-0,8	3,0	2,7	3,4	-2,3	0,4	-1,9	-1,0	2,2	1,2	-0,4	-2,2	0,4
	T	-3,9	1,6	4,7	10,3	9,7	15,6	14,8	15,4	14,8	8,3	2,1	-3,3	7,5
	N	-2,8	-1,3	2,3	6,9	11,8	15,1	16,7	16,0	12,5	7,5	2,4	-1,2	7,1
Jihočeský	O	-1,1	2,9	2,4	3,4	-2,1	0,5	-1,9	-0,6	2,3	0,8	-0,3	-2,1	0,4
	T	-3,2	2,3	5,2	10,6	9,6	15,5	14,8	15,3	15,3	8,7	2,2	-3,1	7,8
	N	-2,7	-1,3	2,3	6,8	11,7	15,0	16,5	15,9	12,5	7,5	2,3	-1,1	7,1
	O	-0,5	3,6	2,9	3,8	-2,1	0,5	-1,7	-0,6	2,8	1,2	-0,1	-2,0	0,7
Plzeňský	T	-3,4	1,6	4,3	9,6	8,4	14,4	13,4	14,2	14,7	8,4	1,9	-3,3	7,0
	N	-2,8	-1,1	2,5	7,3	12,3	15,5	16,9	16,4	12,8	8,0	2,7	-1,0	7,5
	O	-0,6	2,8	2,6	3,4	-2,1	0,7	-1,7	-0,7	2,2	1,4	0,0	-2,2	0,4
	T	2,0	2,6	6,1	11,5	10,7	16,3	15,0	16,3	15,0	9,8	2,0	-2,2	8,6

Obr. 32. Průměrná teplota dle ČHMÚ pro Prahu a středočeský kraj od nejstaršího doloženého měření

Katalog okrajových podmínek : ČR: města a území

Exteriéry | Interiéry

Návrhové hodnoty | Průměrné měsíční hodnoty | Poznámka

Lokalita: Praha

Průměrné měsíční teploty a vlhkosti pro danou lokalitu či místnost:

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
Počet dnů:	31	28	31	30	31	30	31	31
Teplota [C]:	-2,4	-0,9	3	7,7	12,7	15,9	17,5	17
Rel. vlhkost [%]:	81,2	80,8	79,5	77,5	74,5	72	70,4	70,9
Parc. tlak [Pa]:	407	459	603	815	1095	1301	1408	1374

Přepočítat teploty

Měsíc	IX.	X.	XI.	XII.
Počet dnů:	30	31	30	31
Teplota [C]:	13,3	8,3	2,9	-0,6
Rel. vlhkost [%]:	74,1	77,1	79,5	80,7
Parc. tlak [Pa]:	1133	845	599	470

☐ přepočítávat relativní vlhkosti vnějšího vzduchu v závislosti na teplotě podle čl. 7.11.2 v ČSN 730540-3

155 položek

Přidat Vymazat Použít Návrat bez výběru

Obr. 33. Průměrná relativní vlhkost dle měsíců pro Prahu - Area