

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



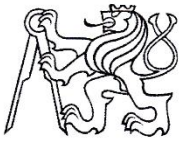
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Možnosti detekce poškození předpínací
výztuže metodou MMM**

Tomáš Dejmek

2019

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dejmek Jméno: Tomáš Osobní číslo: 458947

Zadávající katedra: K134

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Možnosti detekce poškození předpínací výztuže metodou MMM

Název bakalářské práce anglicky: The detection of the prestressing reinforcement corrosion by MMM method

Pokyny pro vypracování:

Provést rešerši metod pro zjištění koroze předpínací výztuže.

Zpracovat návrh zkoušení v laboratoři a následně vyrobit zkušební vzorky přepjaté různě poškozenými kabely pro simulaci korozního poškození.

Provést měření metodou MMM ve spolupráci při různém zatížení vzorků a různé najatosti.

Zpracovat výsledky a vyhodnotit provedené experimenty.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-2, ČSN EN 1993-2

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18.2.2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2019

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

18.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato bakalářská práce byla vypracována samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce doc. Ing. Pavla Ryjáčka, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 28. 5. 2018

.....
Tomáš Dejmek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Ryjáčkovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, za koordinaci celého experimentu a za veškerý čas strávený při konzultacích a v laboratoři.

**Možnosti detekce poškození předpínací
výztuže metodou MMM**

**The detection of the prestressing
reinforcement corrosion by MMM method**

Abstrakt:

Obsahem této práce je shrnutí problematiky koroze předpínacích lan v předpjatém betonu a návržení experimentu pro novou nedestruktivní metodu zjišťování poškození předpínacích lan. Tato metoda je založena na magnetické paměti feritických materiálů. Cílem této práce je ověřit a vyhodnotit, zdali se pomocí této metody detekuje poškození předpínacích lan v konstrukcích.

Klíčová slova:

MMM metoda, NDT metody, předpjatý beton, koroze, předpínací výztuž

Abstract:

The content of this work is a summary of the issue of the corrosion of prestressing cables in prestressed concrete, with a view to design an experiment for a new non-destructive method of detecting damage in prestressed cables. This new method is based on magnetic memory in ferritic material. The aim of this thesis is to verify and evaluate if this method can detect damage of prestressing cables in construction.

Keywords:

MMM method, NDT methods, prestressed concrete, corrosion, prestressing tendons



Obsah

1	Úvod	6
2	Současný stav problematiky	7
2.1	Princip předpjatého betonu.....	7
2.2	Historie předpjatého betonu.....	7
2.3	Materiály předpjatého betonu	8
2.3.1	Beton	8
2.3.2	Předpínací výztuž.....	8
2.3.3	Injektážní malta.....	10
2.4	Technologie předpjatého betonu	11
2.4.1	Předem předpjatý beton.....	11
2.4.2	Dodatečně předpjatý beton.....	11
2.5	Koroze předpínací výztuže	14
2.5.1	Princip vzniku koroze	14
2.5.2	Druhy korozního napadení.....	15
2.6	Protikorozní ochrana předpínací výztuže u betonových předpjatých mostů	18
2.6.1	Protikorozní ochrana u předem předpjatého betonu.....	18
2.6.2	Protikorozní ochrana u dodatečně předpjatého betonu	18
2.7	Současné nedestruktivní diagnostické metody koroze předpínací výztuže.....	19
2.7.1	Vizuální prohlídka	19
2.7.2	Akustická emise.....	20
2.7.3	Ultrazvuková tomografie	20
2.7.4	Ground penetrating radar (GPR)	21
3	Metoda MMM (Metal Magnetic Memory).....	22
3.1	Základní informace	22
4	Numerická analýza oslabené předpínací výztuže	24
4.1	Tvorba numerického modelu.....	24
4.2	Výsledky numerických modelů	30
4.2.1	Výsledky-neoslabené lano	30
4.2.2	Výsledky-oslabení 1 mm	32
4.2.3	Výsledky-oslabení 2 mm.....	34
4.2.4	Výsledky-oslabení 3 mm.....	36



4.3	Vyhodnocení numerických modelů	38
5	Návrh experimentu pro měření metodou MMM	42
5.1	Teoretická příprava experimentu	42
5.2	Statický návrh vzorků	43
5.2.1	Navržená geometrie vzorků	44
5.2.2	Materiálové charakteristiky	44
5.2.3	Vnitřní síly	45
5.2.4	Ohybová únosnost	45
5.2.5	Smyková únosnost	47
5.2.6	Oblast kotevní oblasti	48
5.2.7	Napětí v průřezu	49
5.3	Výroba bednění a výztuže	49
5.4	Betonáž vzorků	51
5.5	Příprava vzorků před předpínáním	53
5.5.1	Odbednění a příprava předpínací výztuže	53
5.5.2	Návrh a rozmístění tenzometrů	53
5.6	Dodatečné předepnutí vzorků	55
5.7	Čtyřbodová zatěžovací zkouška	58
6	Měření pomocí metody MMM	59
6.1	Měření na samostatném předpínacím laně	61
6.2	Měření na předpjatých betonových vzorcích	64
6.2.1	Vzorek A	66
6.2.2	Vzorek B	75
6.2.3	Vzorek C	81
6.2.4	Vzorek D	86
6.2.5	Vzorek E	89
6.2.6	Vzorek F	95
6.2.7	Vzorek G	100
6.2.8	Vzorek H	104
6.2.9	Vyhodnocení výsledků experimentu	109
6.3	Měření na mostních objektech	111
6.3.1	Lávka přes řeku Sázavu	111
6.3.2	Lávka v Radonicích	114



6.3.3	Most ev.č. B-081 (Mírového hnutí - Benkova).....	119
7	Závěr.....	123
8	Seznam obrázků	124
9	Seznam tabulek	128
10	Použité normy a literatura	129
11	Zdroje obrázků	131



1 Úvod

Mostní konstrukce jsou důležitou součástí dopravní infrastruktury každého státu, které jsou navrhovány za účelem spolehlivě sloužit po dobu až 100 let. Na začátku 20. století se začala v mostním stavitelství používat technologie předpjatého betonu. Tato technologie u nás nabyla velké oblíbenosti. V dnešní době mají v České republice předpjaté mostní konstrukce dominantní zastoupení.

Obecně technologie předpjatého betonu využívá efektivně mechanické vlastnosti oceli a betonu. Nosný ohýbaný prvek je tvořen betonem, do kterého je umístěna napnutá předpínací výztuž. Tím se zajistí dostatečná tlaková rezerva průřezu, která je výhodná pro beton. Starší předpjaté mostní konstrukce jsou podrobovány pečlivým diagnostikám z důvodu rizika koroze předpínací výztuže, která může vést ke kolapsu konstrukce. Vzhledem k tomu, že je předpínací výztuž ukrytá v betonu, jsou tyto diagnostiky obtížné a nejisté. Proto se v poslední době usiluje o nové nedestruktivní metody, které by diagnostiku ulehčily, a hlavně se mohly do budoucna používat i v praxi.

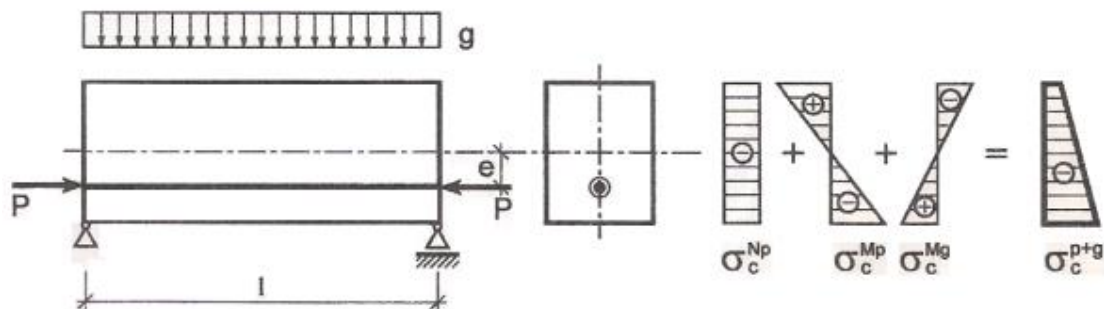
Cílem této práce je celkové shrnutí problematiky koroze předpínacích lan a stávajících nedestruktivních diagnostických metod. Dále byla provedena numerická analýza předpínacího lana s různou úrovní oslabení průřezu pro zjištění chování v okolí poškození. Na závěr se tato práce zabývá novou nedestruktivní diagnostickou metodou založenou na magnetické paměti feritických materiálů, tzv. MMM metoda. Pro tuto metodu byl navržen experiment, pomocí kterého se ověří použitelnost pro lokalizaci poškození předpínací výztuže u předpjatých betonových konstrukcích.



2 Současný stav problematiky

2.1 Princip předpjatého betonu

Princip předpjatého betonu spočívá v napnutí předpínací výztuže betonovým prvkem. Výztuž se snaží vrátit do původního stavu a tím vnáší tlakové napětí do betonového prvku nezávislé na vnějším zatížení. Tím eliminujeme nebo zcela vyloučíme tahové namáhání od vnějšího zatížení. Tak dokážeme efektivně využít mechanické vlastnosti obou materiálů.[3]



Obr. 1 Rozložení napětí v mimostředně předpjatém průřezu zatíženým spojitým zatížením [3]

2.2 Historie předpjatého betonu

Ve druhé polovině 19. století začaly být využívány výztužné prvky z oceli v betonových konstrukcích. Princip spočíval v tom, že ohýbaný betonový prvek přenáší tlaková napětí a ocelové výztužné prvky tahová napětí. To umožnilo použití betonu i pro deskové a trémové konstrukce, které doposud nemohly být realizovány, z důvodu malé pevnosti betonu v tahu. Tento objev vedl k rozvoji železobetonových konstrukcí a postupem se stal nejrozšířenějším konstrukčním materiálem. [3]

Na konci 19. století se vedly teoretické úvahy o rozložení napětí u ohýbaného betonového prvku s cílem vyloučit taženou část průřezu a zabezpečit jeho dostatečnou tlakovou rezervu. To by se dosáhlo při napnutí výztuže. Tato myšlenka se dá považovat za počátky předpjatého betonu. V roce 1886 P. H. Jackson jako první získal patent na napnutí ocelových tyčí a jejich upevnění v betonové stropní desce. Nezávisle na tom v roce 1888 C. E. W. Doehring získal patent na natažené dráty umístěné v betonu, aby se omezil vznik trhlin. Oba použili běžnou ocel a počáteční tlakové napětí z betonu po čase vymizelo. Až teprve roku 1928 E. Freyssinet poprvé použil pro předpínání ocel o vysoké pevnosti. Ukázalo se, že použitím oceli o vysoké pevnosti dosáhneme přijatelnějších ztrát vlivem dlouhodobých účinků dotvarování a smršťování. Tyto ztráty předpětí se pohybují okolo 20 % na rozdíl od běžných



ocelí, kde dojde ke ztrátě až 2/3 vneseného předpětí. Tento objev vedl k velkému rozvoji předpjatých konstrukcí ve světě. První předpjatou konstrukci u nás navrhl L. Pacholík až v roce 1946. Jednalo se o silniční most u Koberovic o rozpětí 13,80 m. [1],[3]

Počátkem 60. let se objevila myšlenka typizace mostních nosníků. Princip spočíval v tom, že byly navrženy mostní nosníky s určitými průřezy na určitá rozpětí (později nahrazeno délkou nosníku). Pro návrhy mostů z těchto nosníků již nebylo nutné provádět statický výpočet nosné konstrukce, což vedlo k úspoře času. I pro výrobu to znamenalo velký ekonomický přínos. Přes počáteční velké výhody se později ukázalo, že z dlouhodobého hlediska typizace výhodná nebyla. Vývoj mostních konstrukcí probíhal rychleji, což vedlo ke zdokonalování a optimalizování mostních průřezů v průběhu let. Navzdory tomu vznikla v tomto období velká řada předpjatých mostních konstrukcí. [1]

V dnešní době jsou předpjaté mostní konstrukce stále oblíbené a vznikají ve velké míře.

2.3 Materiály předpjatého betonu

2.3.1 Beton

Pro předpjatý beton se používají kvalitní betony o pevnostech okolo 40 až 60 MPa. Je kladen velký důraz na vlastnosti betonové směsi jako je pevnost, zpracovatelnost, rychlost tuhnutí a reologické vlastnosti. Obvykle bývá betonová směs navržena specializovaným technologem na základě laboratorních zkoušek. Dále jsou uvedeny pouze orientační údaje betonové směsi. Pro předpjatý beton se používají kvalitní portlandské cementy třídy 42,5 nebo 52,5. Kromě kvality cementu je důležitý i vodní součinitel w/c , který udává poměr obsahu vody ku cementu. Další velmi důležitá složka je kamenivo. Mělo by být objemově stálé, zbavené nečistot, tvrdé a neporézní. Jeho poměr hrubé a jemné frakce okolo 65:35. Do betonové směsi se přidávají navíc přísady a příměsi, které zlepšují vlastnosti. [3], [4]

2.3.2 Předpínací výztuž

Předpínací výztuž se vyrábí z nízkolegované oceli válcované za tepla s vysokým obsahem uhlíku. Tím se zajistí vyšší pevnost v tahu. Požadovaných vlastností se dosahuje jejím chemickým složením a technologií výroby. Dle těchto hledisek můžeme rozdělit předpínací výztuž do dvou skupin:

- předpínací tyč
- patentovaný drát [3], [4]



2.3.2.1 Předpínací tyč

Předpínací tyče jsou vyráběny v délkách od 6 do 30 metrů v průměrech 12-75 mm. Jejich pevnost v tahu je okolo 1000 MPa. Povrch tyčí může být hladký nebo žebírkovaný. Ocel je špatně svařitelná, proto žebírka vytvářejí závit pro kotvení a napojování. Pro velké průměry jsou předpínací tyče zušlechťovány ohřevem na 1000 °C s prudkým zakalením v olejové lázni. Tím dojde ke vzniku martenzitické struktury, která je tvrdá, ale křehká. Poté se materiál opět zahřeje po určitou dobu na teplotu 450 až 650 °C, tím se sníží jeho křehkost. Tento postup se nazývá popouštění. [2], [3], [4]



Obr. 2 Předpínací tyč [16]

2.3.2.2 Patentovaný drát

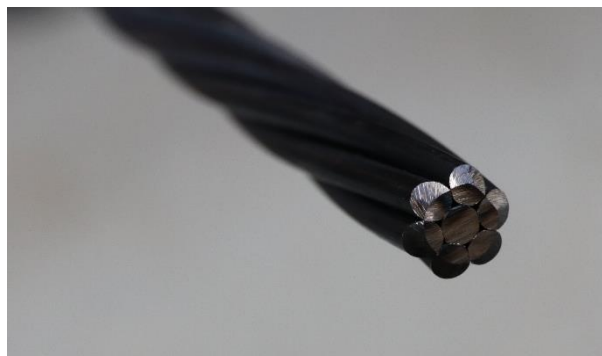
Patentovaný drát je nejčastěji používanou předpínací výztuží. Drát se válcuje z nízkoalokované oceli do průměru 5,5 až 16 mm ve válcovnách. Poté je dodán do drátovny, kde se tento drát nejprve patentuje. Drát se zahřeje v plynové peci na 900 °C a postupně se ochlazuje v olověné lázni. Patentováním dojde ke vzniku struktury z trustitu (jemný perlit), která je vhodná k tvářeni za studena. Při tvářeni za studena se drát protahuje stále menšími kuželovitými průvleky, tím se zmenšuje průměr a zvyšuje pevnost (1500-1800 MPa). Takto upravená výztuž se nazývá nepopouštěná. Avšak dochází ke snížení tažnosti drátu a k nárůstu vnitřního pnutí. Vnitřní pnutí lze odstranit popouštěním nebo stabilizováním. Technologie popouštění je uvedena v předchozí kapitole. Při stabilizaci je drát napínán až na 1 % protažení při teplotě 350-400 °C. Na rozdíl od popouštění je dosaženo vyšších mechanických a reologických vlastností (snížení relaxačních ztrát). [2], [4]

Samostatné patentované dráty se dříve využívaly pro předpínání ovíjením (např. síla, nádrže, tlaková potrubí). Pro použití u předem předpjatých konstrukcí byl povrch hladkého drátu upraven, aby se zajistila soudržnost. Jednalo se například o zvlnění drátu používaného u pražců. [4]



U dodatečně předpjatých konstrukcí se dříve používaly svazky souběžných drátů, které se nazývají kabely. Kabely jsou vedeny v kabelových kanálcích nebo na povrchu konstrukce. Jsou tvořeny 5 až 20 dráty průměru 4,5 mm nebo 10 až 24 dráty průměru 7 mm. Provlákání drátů kabelovým kanálkem vedlo ke zvlnění některých drátů. To způsobovalo například praskání drátů, obtížnou injektáž nebo velké ztráty třením. Uvedené nedostatky se odstranily při použití usměrněných kabelů. Usměrněné kabely se skládají z 8 a 16 drátů průměru 7 mm umístěných ve dvou vrstvách, které od sebe navzájem odděluje vazací drát. Jádro kabelu tvoří tuhá šroubovice z drátu průměru 2 mm. [4]

Pro předem a dodatečně předpjaté konstrukce se nejčastěji používají lana (pramence). Lana tvoří celkem sedm drátů, jeden přímý centrální drát, který ovíjí po obvodu do šroubovice šest zbylých drátů. Toto uspořádání zlepšuje injektáž kanálků a soudržnost s betonem. Lana se dělají v různých jmenovitých průměrech (12,5 mm, 15,3 mm, 15,7 mm) s různými pevnostmi v tahu (1770 MPa nebo 1860 MPa). [3], [4]



Obr. 3 Předpínací lano (foto: Martin Jonáš)

2.3.3 Injektážní malta

Injektážní malta vyplňuje prostor kanálků, ve kterých je umístěna předpínací výztuž. Zajišťuje ochranu před korozí a spolupůsobení výztuže s betonem. Injektážní malta je směs vody, cementu a přísad pro zvýšení tekutosti. Vodní součinitel se pohybuje okolo 0,5. Na injektážní maltu je kladena řada požadavků:

- směs musí být dostatečně tekutá, aby vyplnila všechny mezery
- při tuhnutí malty se nemá odlučovat voda
- dostatečná pevnost [3], [4]



2.4 Technologie předpjatého betonu

2.4.1 Předem předpjatý beton

U předem předpjatého betonu jsou nejprve napnuta předpínací lana. Tato lana dočasně zakotvíme a následně vybetonujeme nosný prvek. Po dostatečném vytvrnutí betonové směsi dojde k uvolnění zakotvených lan, a tím se do betonového prvku vnese tlakové napětí. Předpínací výztuž je kotvena soudržností s betonem. Dílce mají přímou předpínací výztuž často umístěnou v blízkosti okraje, aby se zajistila maximální ohybová únosnost. Technologie předem předpjatého betonu našla největší uplatnění u výroby prefabrikátů. Výroba probíhá výhradně ve specializovaných výrobnách (tzv. prefy) na dlouhých linkách (až 200 m) nebo v tuhých formách. Výhody této výroby spočívají ve velké přesnosti a kvalitě vyrobených dílců. Na druhou stranu jsou nosníky omezeny výrobní typizací s určitými rozměry a průřezy. [3]



Obr. 4 Předem předpjaté mostní nosníky [23]



Obr. 5 Výroba předem předpjatého nosníku [24]

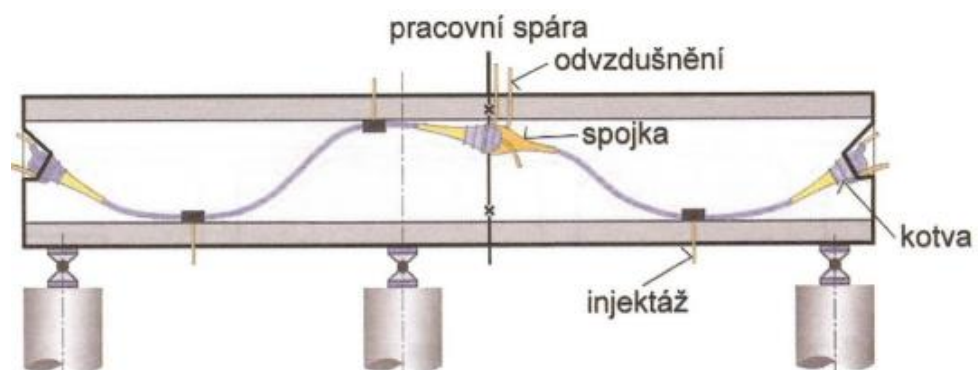
2.4.2 Dodatečně předpjatý beton

U dodatečně předpjatého betonu dojde nejprve k betonáži nosného prvku, který se po vytvrnutí předepne. Předpínací výztuž prochází uvnitř kanálky ve vybetonovaném prvku, tzv. vnitřní volná předpínací výztuž nebo mimo, tzv. vnější předpínací výztuž. U této technologie je možné použít kotvení se soudržností nebo bez soudržnosti. Soudržnost se zajišťuje pomocí injektáže kanálků. Základní prvek pro dodatečně předpjatý beton se nazývá předpínací kabel, může ho tvořit samostatný drát nebo lano, ale více jsou používány skupiny drátů nebo lan. [3]

Nejčastější technologií dodatečně předpjatého betonu je vícelanový předpínací systém se soudržností. Předpínací kabely tvoří skupina lan (12, 15, 19 nebo 22 lan), které prochází v předem připravených kanálkách v betonovém



dílci. Kanálky jsou ocelové nebo plastové z PE trubek. Jejich proměnný průběh konstrukcí odpovídá statickému působení. Na koncích kabelu se nacházejí kotevní zařízení, které slouží k lepšímu napínání a trvalému zakotvení kabelu pomocí předpínací pistole. Posledním krokem je injektáž kanálků injektážní maltou. Celá technologie je dodávána specializovanými firmami s vlastním řešením významných detailů. [3], [4]



Obr. 6 Schéma technologie vícelanového předpínacího systému [3]



Obr. 7 Kotevní oblast [25]

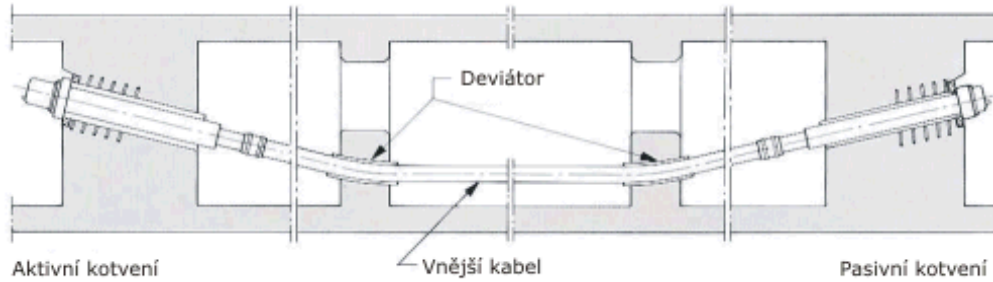


Obr. 8 Připravené chráničky pro předpínací výztuž [26]

Předpínací systém s vnější volnou výztuží má předpínací kabely vedeny mimo betonový prvek. Ty jsou umístěny v ocelové nebo plastové PE trubce a tvoří polygon. Ve vrcholech polygonu přenášíme účinky předpětí do konstrukce pomocí, tzv. deviátorů, což jsou masivně vyztužené kotevní bloky. Kabely bývají zainjektované, přesto se jedná o volnou výztuž bez soudržnosti



s betonem. Tato technologie se používá u komorových mostních nosníků. Velkou výhodou je snadná inspekce nebo výměna jednotlivých kabelů. Mezi období volných kabelů můžeme řadit i předpjaté závěsy zavěšených mostů. [3], [4]



Obr. 9 Schéma technologie předpínacího systému s vnější volnou výztuží [20]



Obr. 10 Komorový nosník s vnější volnou předpínací výztuží [27]



2.5 Koroze předpínací výztuže

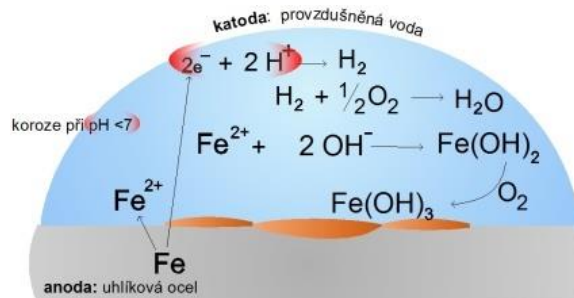
2.5.1 Princip vzniku koroze

Pro předpjatý beton je nejzávažnější poruchou koroze předpínací výztuže. Koroze vzniká především při nedodržování předpisů pro zpracování materiálů nebo provádění staveb, tím v konstrukci mohou vznikat poruchy, které umožní přístup agresivnímu prostředí ve formě různých vodných roztoků. Účinky koroze také zvyšuje proměnlivá vlhkost vzduchu nebo kolísání teploty. Předpínací výztuž je také vystavena velkému tahovému napětí, které ovlivňuje korozní procesy. [5]

Při korozi kovů dochází k fyzikálně chemické interakci kovu a okolního prostředí, vedoucí ke změnám vlastností kovu, které zhoršují jeho vlastnosti, nebo ovlivňují nepříznivě okolní prostředí. Korozi kovu lze třídit dle různých měřítek. [5]

U předpínací výztuže dochází zejména ke korozi v elektricky vodivých prostředích. Jedná se o elektrochemickou korozní reakci založenou na galvanickém efektu, který vzniká za přítomnosti elektrolytu (vodný roztok) a obsahuje dvě dílčí reakce, anodickou a katodickou. Rychlost koroze je určována rychlostmi těchto reakcí. Obě probíhají současně a mohou být podstatně zvýšeny přítomností vnějšího elektrického pole stejnosměrného napětí. Při anodické reakci se oxiduje ocel, tzv. vlastní koroze. Katodická reakce odpovídá současně redukci oxidující složky v roztoku, tzv. depolarizační reakce. Tyto reakce vytváří na povrchu oceli oxidovanou vrstvu, při které probíhá samočinné zpomalení reakce, protože zabraňuje dalšímu přístupu kyslíku k oceli. Nejčastějšími druhy koroze v elektricky vodivých prostředích jsou:

- atmosférická koroze
- koroze ve vodním prostředí
- koroze bludnými proudy [5], [6]



Obr. 11 Vznik elektrochemické koroze na povrchu oceli [19]



2.5.1.1 Atmosférická koroze

Atmosférická koroze vzniká pouze v dostatečně vlhkých prostředích. Reálná atmosféra vždy obsahuje i malé množství vodní páry, která může v závislosti na okolních podmínkách (teplota, vlhkost) kondenzovat na povrchu kovu. Na povrchu se vytvoří tenká vrstvička elektrolytu, která tvoří základní předpoklad vzniku koroze. Atmosférickou korozi u předpínací výztuže může způsobit nevhodné skladování ve vlhkých prostředích po výrobě. Výzkum ukázal, že skladování v suché atmosféře zabraňuje korozi. Limitní hodnota vlhkosti vzduchu v neznečištěné atmosféře je přibližně 50 %. Tato hodnota může být ovlivněna přítomností nečistot v atmosféře nebo na povrchu oceli. [5], [6]

2.5.1.2 Koroze ve vodním prostředí

Přítomnost vody je nejčastějším důvodem koroze oceli a může být předpokladem vzniku dalšího korozního rozrušování. V chemickém složení vody se mohou vyskytovat různé látky jako rozpuštěné plyny (kyslík), kyseliny, zásady a soli, které mohou nepříznivě ovlivňovat korozní chování. Rozpuštěný kyslík je základním činidlem koroze oceli, protože v bezkyslíkatých vodách nedochází téměř ke korozi. Přítomnost chloridů v kyslíkatých vodách korozi zesiluje. Mimo chemického složení ovlivňuje korozní chování teplota nebo proudění vody. [6]

2.5.1.3 Koroze bludnými proudy

Speciálním případem koroze v elektricky vodivém prostředí je koroze bludnými proudy. Rychlost koroze se podstatně zvýší, pokud elektrolytem prochází zdroj vnějšího stejnosměrného napětí. K tomuto jevu může docházet u elektrifikovaných drah využívajících koleje jako zpětného vodiče. [5]

2.5.2 Druhy korozního napadení

Druhy korozního napadení se projevují různými způsoby, které se dělí dle intenzity, charakteru pronikání prostředí do kovu a zároveň porušování jeho struktury. [6]

- rovnoměrná koroze
- bodová koroze
- štěrbinová koroze
- korozní praskání



2.5.2.1 Rovnoměrná koroze

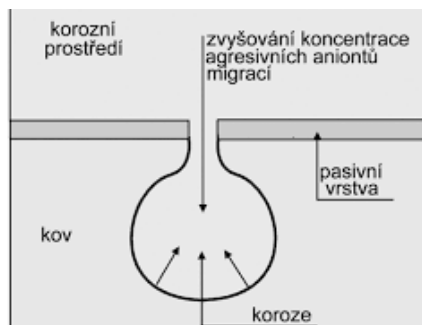
Při rovnoměrné korozi dochází k postupnému rozpouštění po celém povrchu. Lze vyjádřit např. úbytkem tloušťky v mm za rok. [7]



Obr. 12 Rovnoměrná koroze předpínacího lana (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.)

2.5.2.2 Bodová koroze

K bodové korozi dochází hlavně v roztocích halogenů. Ionty halogenů dokáží pronikat pasivní oxidovou vrstvou na povrchu oceli mnohem snadněji. Při korozi se vytvářejí ojedinělé korozní body, které rychle postupují do hloubky. Okolní prostředí zůstává bez napadení. [7]



Obr. 13 Princip vzniku bodové koroze [18]



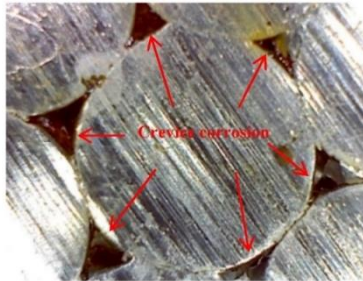
Obr. 14 Bodová koroze předpínacího lana [28]

2.5.2.3 Štěrbinová koroze

Štěrbinová koroze vzniká v úzkých mezerách (pod $10\mu\text{m}$) mezi kovovými povrchy. Přítomnost elektrolytu ve štěrbině iontově komunikuje s okolím, ale její malý rozměr omezuje difúzi. Ve štěrbině je elektrolyt rychle zbaven kyslíku katodickou reakcí. Po vyčerpání kyslíku vzniká uvnitř štěrbiny anodická oblast s kladným nábojem, aby se tento stav kompenzoval dochází k iontovému přenosu převážně chloridových iontů (Cl^-). Tím se zvyšuje



agresivita a rychlost koroze v této oblasti. U předpínacích lan k této korozi může docházet na styku lan. [7], [8]



Obr. 15 Štěrbínová koroze [21]



Obr. 16 Bodová a štěrbinová koroze [21]

2.5.2.4 Korozní praskání

Při působení koroze a mechanického namáhání postupuje korozní napadení intenzivněji než při odděleném působení obou vlivů. Jev korozního praskání vzniká pouze v určitých prostředích za působení tahových napětí. V materiálu vznikají a rostou trhliny, které vedou k prasknutí připomínající křehký lom. Trhliny se šíří mezikrystalově, transkrystalově nebo kombinací. Existují dvě základní teorie, které vysvětlují jev korozního praskání. První teorie je založena na vzniku místního korozního článku při elektrochemickém rozpouštění kovu. Druhá popisuje oslabení kohezních vazeb mezi atomy na povrchu kovu adsorpcí složky prostředí. K této adsorpci dochází primárně na defektním místě např. dno trhliny. U předpínací výztuže může způsobovat korozní praskání i adsorbovaný vodík vznikající při korozní reakci, tzv. vodíková křehkost. [7], [8]



Obr. 17 Vznik korozního praskání [17]



2.6 Protikorozní ochrana předpínací výztuže u betonových předpjatých mostů

Kvalitní provedení protikorozní ochrany předpínací výztuže u mostních objektů je základním předpokladem pro spolehlivé fungování konstrukce. Protikorozní ochrana se liší pro jednotlivé technologie předpjatého betonu a můžeme je rozdělit na:

- protikorozní ochrana u předem předpjatého betonu
- protikorozní ochrana u dodatečně předpjatého betonu

2.6.1 Protikorozní ochrana u předem předpjatého betonu

U předem předpjatých konstrukcí zajišťuje protikorozní ochrany předpínací výztuže dostatečná krycí vrstva betonu. Vlivem silně alkalického prostředí betonu ($\text{pH} > 12,5$) se na povrchu výztuže vytvoří mikroskopická oxidovaná vrstva, tzv. pasivační (ochranná vrstva), která zabraňuje korozi. [6]

Hodnota pH betonu se snižuje účinkem agresivního prostředí. Jedná se především o karbonizaci betonu nebo účinek chloridových iontů. Pokud pH klesne pod hodnotu 9 nebo obsah chloridů dosáhne kritické hodnoty dochází k porušení ochranné vrstvy na povrchu oceli a může vznikat koroze. [6]

2.6.2 Protikorozní ochrana u dodatečně předpjatého betonu

Předpínací výztuž je u této technologie vložena až po vytvrdnutí betonové konstrukce do předem připravených kanálků, které se poté zainjektují cementovou maltou, a tím se zajistí protikorozní ochrana předpínací výztuže. [3], [4]

Dříve se u nás pro mostní konstrukce využívaly různé způsoby výroby kanálků. Na počátku se používaly elektroinstalační trubky, které se příliš neosvědčily. Měly malou tuhost a nezaručovaly soudržnost s betonem. Nejčastěji se používají kovové trubky SANDRIK, které jsou vyrobeny ze svinutého pásu ocelového plechu tl. 0,3 mm. Kanálky byly také vytvářeny pomocí dodatečně vytahovaných vložek. Používaly se ocelové trubky natřené odbedňovacím prostředkem nebo zabetonované spirály, které se po určité době vytáhly a vytvořily kanálek s betonovým povrchem. Kanálky je také možné vytvořit pomocí polyetylenových trubek, které mají velkou chemickou odolnost a zajišťují lepší ochranu proti korozi. [3], [4]

Po umístění předpínací výztuže do kanálků a jejím napnutí je nutné provést co nejrychleji injektáž. Injektážní malta zajišťuje protikorozní ochranu stejným způsobem jako beton u předem předpjatých prvků. Nejprve se předem připravený kanálek profoukne stlačeným vzduchem, aby se odstranily nečistoty. Injektážní malta se vhání pod tlakem do kanálků injektážními otvory



v kotvě. Aby nedocházelo ke vzniku mezer vyplněných vzduchem, mají kanálky v nejvyšších místech odvzdušňovací trubky. Po injektáži se kotvy většinou zabetonují. [3]

Při provádění protikorozní ochrany mohou vznikat chyby, které mohou vést ke vzniku koroze předpínacích lan. Jednou z mnoha příčin je například vznik vzduchových mezer v injektážní maltě při nesprávném odvzdušnění. V mezerách se později může rozšířit koroze.

2.7 Současné nedestruktivní diagnostické metody koroze předpínací výztuže

Spolehlivost a bezpečnost mostních konstrukcí je důležitá pro správné fungování infrastruktury. Proto jsou na mostních konstrukcích prováděny prohlídky. Prohlídky jsou prováděny s cílem diagnostikovat stav mostní konstrukce a následně začlenit most do příslušné kategorie. Mosty pozemních komunikací se řadí do VII kategorií, kde I. znamená bezvadný stav a VII. havarijní stav. [9] Železniční mosty mají 3 stupně hodnocení stavebního stavu, kde 1. stupeň znamená běžnou údržbu a 3. stupeň objekt vyžadující rekonstrukci. [10] Správné zařazení konstrukce dle svého aktuálního stavu do správné skupiny může být komplikované. Závady nemusí být zřetelně patrné při prováděné prohlídce.

U předpjatých betonových konstrukcí tento problém nastává při určení poškození předpínacích lan, která jsou ukryta pod vrstvou betonu. Proto se v posledních letech rozvíjejí různé nedestruktivní diagnostické metody, tzv. NDT (Non Destructive Testing), které by mohly nepřímým způsobem lokalizovat poškození i přes vrstvu betonu. Mezi současné diagnostické metody pro detekci poškození předpínací výztuže můžeme zařadit:

- vizuální prohlídku
- akustickou emisi
- ultrazvukovou tomografii
- ground penetrating radar (GPR)

2.7.1 Vizuální prohlídka

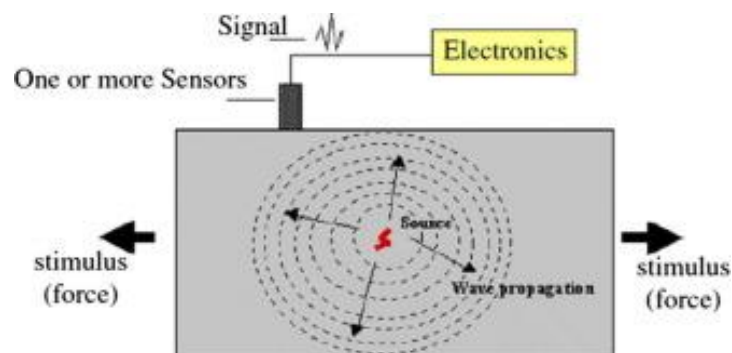
Vizuální prohlídka mostních konstrukcí patří mezi základní NDT metody pro posouzení stavu viditelných povrchů. Odhalení jednotlivých nedostatků závisí především na zkušenostech inženýra. Mostní konstrukce se podrobují každý rok vizuálním prohlídkám, které jsou prvním ukazatelem stavu konstrukce. Prohlídky se provádějí v různém rozsahu v různých časových intervalech dle stavu mostní konstrukce. Hlavní výhodou této metody spočívá v rychlé identifikaci zjevných závad a nízkým nákladům na její provedení. Zjevné závady můžou být trhliny betonu, prosakování vody, odkrytá místa



výztuže, korozi výztuže atd. Na druhou stranu pomocí této metody se dají obtížně detekovat poškození uvnitř betonu. U předpjatých konstrukcích je tímto problémem detekce koroze předpínací výztuže. Pomocí vizuální prohlídky dokážeme pouze odhadnout, že pravděpodobně dochází ke korozi předpínací výztuže. [9], [11]

2.7.2 Akustická emise

Akustická emise se současně využívá pro detekci poškození v různých oborech (např. strojařský průmysl). V mostním inženýrství se tato metoda zatím postupně rozvíjí. Jedná se o NDT metodu, která dokáže detekovat a lokalizovat poškození v materiálu. Akustická emise je založena na přechodných elastických vlnách vznikající rychlým uvolněním energie z materiálu, které jsou zachyceny pomocí přijímače. Měření akustickou emisí je složeno ze dvou dílčích kroků. Prvním krokem je deformace materiálu vytvářející elastické vlny. Ve druhém kroku se měří odezva konstrukce. Pokud se v materiálu vytvoří vada, poškození nebo trhlina dochází k uvolnění energie ve formě vysokofrekvenčních zvukových vln (primární a sekundární emise), které jsou zachycovány snímači a senzory. [11]



Obr. 18 Princip měření akustickou emisí [11]

Při diagnostice akustickou emisí je možné provádět globální a lokální měření. Při globálním měření dochází ke sledování celé struktury konstrukce. Zatím co lokální měření dokáže zkoumat určitou konkrétní zónu porušení. Avšak konstrukce musí být zatěžována, aby akustická emise odhalila místo poruchy což omezuje tuto metodu [11]

2.7.3 Ultrazvuková tomografie

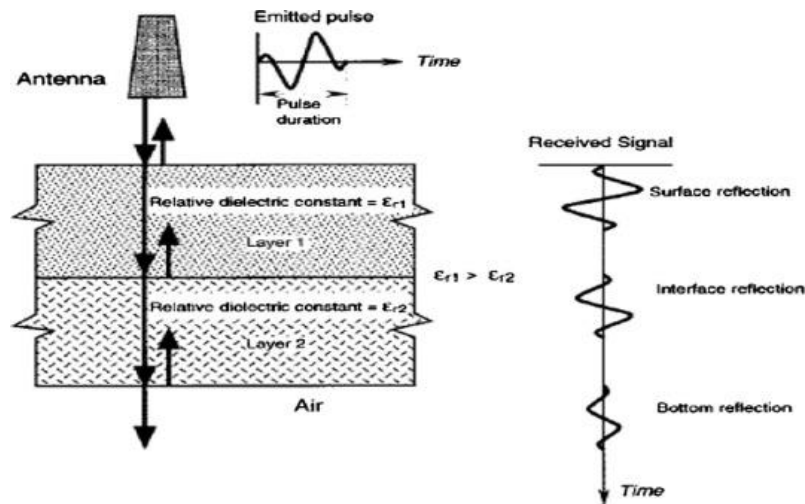
Metoda ultrazvukové tomografie je založena na vysílání ultrazvukových vln materiálem, které jsou následně zaznamenány v přijímacím zařízení. Pokud vlna narazí na defekt, její malá část emitované energie se odráží zpět na povrch materiálu. Vady jsou tedy identifikovány jako anomálie akustické impedance. V oblastech trhlin a dutin je rychlost ultrazvukových vln výrazně



nižší. Ultrazvuková tomografie dokáže odhalit heterogenity v materiálu např. nezainjektované kanálky u předpínací výztuže. [11]

2.7.4 Ground penetrating radar (GPR)

Diagnostická metoda GPR je založena na elektromagnetických vlnách. Zařízení se skládá z antény, zobrazovací jednotky a zařízení pro záznam dat. Do materiálu vysílá anténa krátké pulsy elektromagnetické energie, které pronikají materiálem. Na rozhraní dvou materiálů dielektrických rozdílných vlastností se část energie odrazí zpět k anténě. Pomocí metody GPR lze provést diagnostiku betonových konstrukcí, pomocí které lze odhalit dutiny, oblasti s vysokou vlhkostí, polohu ocelové výztuže. Nelze ale zjistit oslabení výztuže či její průměr. [11]



Obr. 19 Princip GPR [11]



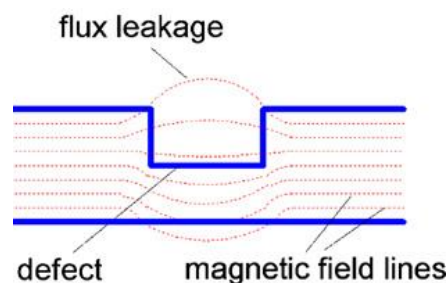
3 Metoda MMM (Metal Magnetic Memory)

3.1 Základní informace

Metoda magnetické paměti kovů je nová nedestruktivní diagnostická metoda, která dokáže lokalizovat poruchy nebo koncentrace napětí (SCZ, Stress Concentration Zones) ve feromagnetických materiálech. [12]

Objevitelem této metody je ruský expert A. A. Dubov, který v roce 1994 představil koncept magnetické paměti materiálu, kterou následně aplikoval do vývoje nedestruktivní metody. V roce 1999 představil princip a aplikaci této NDT metody pro potrubní technologie. Metoda magnetické paměti je založena na měření a analýze intenzit vlastního magnetického pole (tzv. SMFL-Self Magnetic Flux Leakage) feromagnetických látek. [12]

Pokud se feromagnetická látka ochladí pod tzv. Curieho teplotu (pro železo 768 °C) vytvářejí se magnetické domény během krystalizačního procesu. Magnetické domény mají tendenci se vyrovnat ve směru geomagnetického pole Země a vytváří magnetickou strukturu, kterou ovlivňují nečistoty, způsob chlazení, mřížkové defekty, vnější napětí. Magnetické siločáry proudí uvnitř homogenního feromagnetického materiálu v uzavřených smyčkách. Při vzniku mřížkových defektů nebo přítomnosti napětí v materiálu dochází k nevratným změnám doménových struktur. Mění se permeabilita materiálu, která vede ke změně intenzity vlastního magnetického pole (viz obr. 21). Tento jev zůstává i po odstranění vnějšího zatížení. V důsledku toho lze stanovit poškození feromagnetického materiálu měřením jeho povrchové distribuce SMFL. Metoda MMM je založena na fyzikálním principu nazývaném magnetomechanický efekt (magnetomechanical effect), který popisuje interakci mezi napětím a magnetismem. [12], [13]



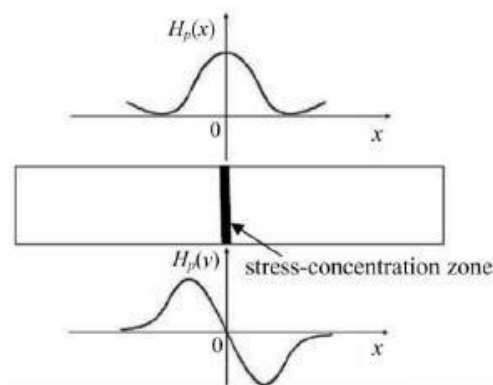
Obr. 20 Magnetické siločáry v místě defektu [22]



Základní dva parametry popisující intenzitu magnetického pole:

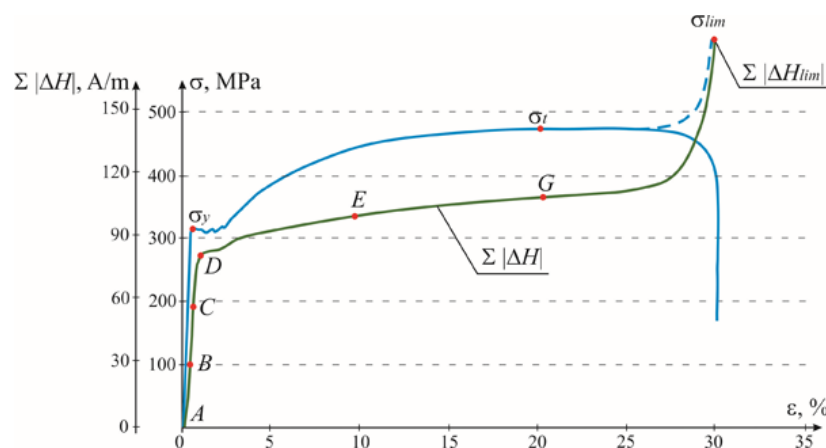
- tangenciální složka intenzity magnetického pole $H(x)$ [A/m], která je rovnoběžná s povrchem vzorku
- normálová složka intenzity magnetického pole $H(y)$ [A/m], která je kolmá na povrch vzorku

V zóně koncentrace napětí dosahuje tangenciální složka $H_p(x)$ maximální hodnoty. Zatímco normálová složka $H_p(y)$ přechází z kladné do záporné hodnoty, přičemž nulová hodnota odpovídá maximální hodnotě složky tangenciální. [12]



Obr. 21 Schéma SMFL distribuce v zóně koncentrace napětí [12]

Pro klasickou ocel byl z experimentu stanoven průběh intenzity magnetického pole při tahové zkoušce, který přibližně odpovídá pracovnímu diagramu oceli. S rostoucím napětím v materiálu dochází ke změnám uvnitř struktury materiálu, a tím roste intenzita magnetického pole. [15]



Obr. 22 Pracovní diagram oceli kombinovaný s grafem vývoje intenzity magnetického pole [15]



4 Numerická analýza oslabené předpínací výztuže

Při rovnoměrném korozním poškození se postupně oslabuje průřez předpínací výztuže a dochází k zvýšení namáhání v této oblasti. Cílem numerického modelu bylo ověřit chování v místě oslabení a stanovit závislost mezi napětím v oslabené a neoslabené oblasti.

4.1 Tvorba numerického modelu

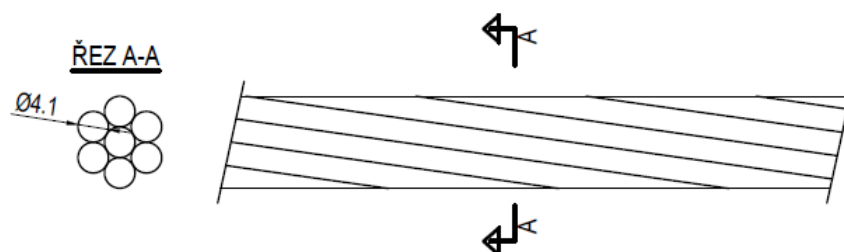
V programu Abaqus byla provedena simulace tahového namáhání části předpínacího lana.

Celkem byly vytvořeny 4 numerické modely:

- neoslabené lano



Obr. 23 3D model neoslabeného lana



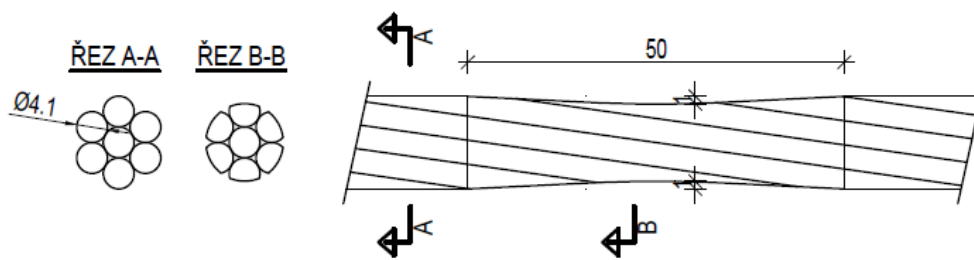
Obr. 24 Detail neoslabeného lana



- oslabení 1 mm



Obr. 25 3D model oslabení 1 mm

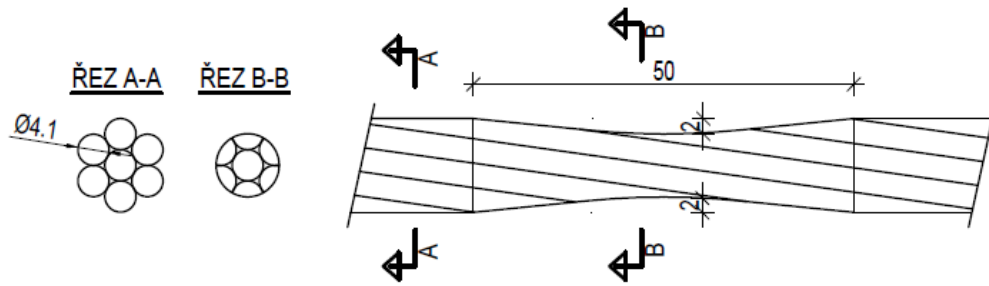


Obr. 26 Detail oslabení 1 mm

- oslabení 2 mm

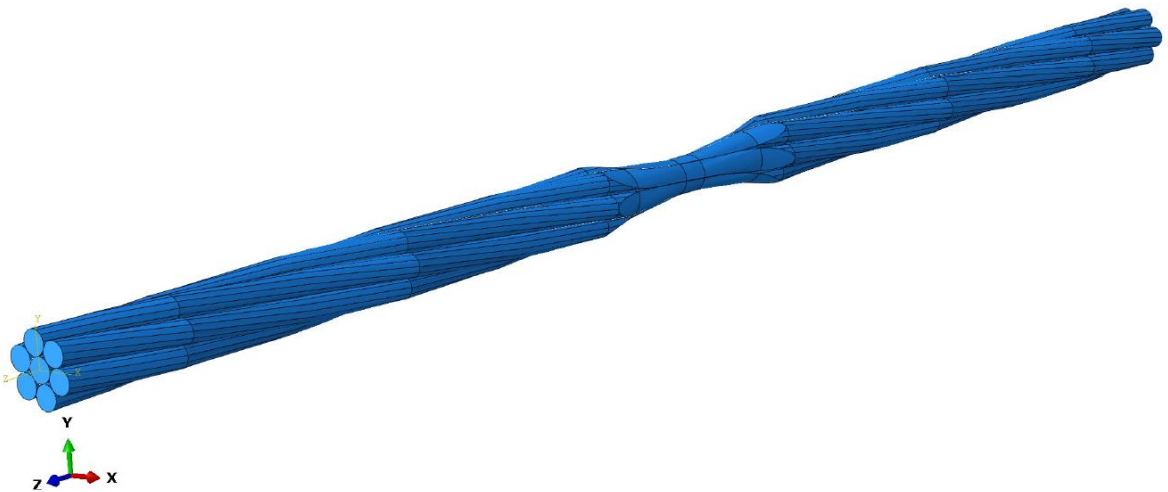


Obr. 27 3D model oslabení 2 mm

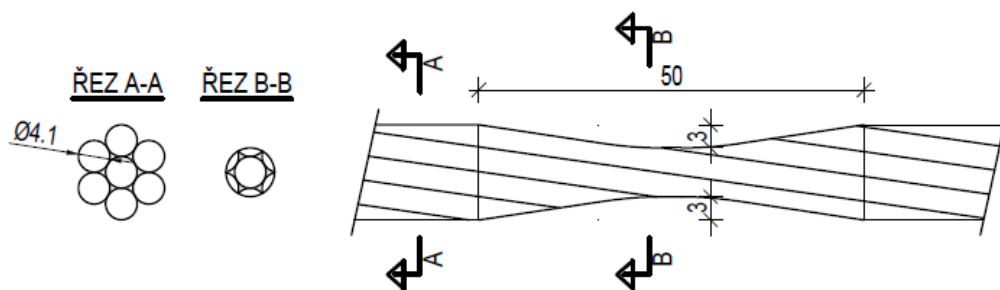


Obr. 28 Detail oslabení 2 mm

- oslabení 3 mm



Obr. 29 3D model oslabení 3 mm

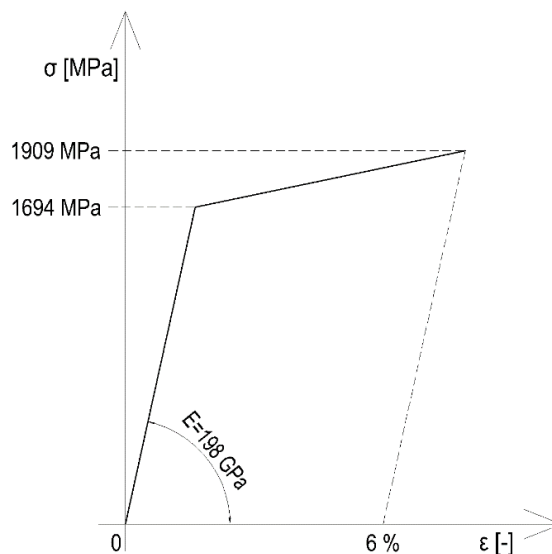


Obr. 30 Detail oslabení 3 mm



Lano se skládá dohromady ze 7 drátů průměru 4,1 mm (1 centrální lano a zbylých 6 šroubovitě ovinuté). Délka části lana je $L=300$ mm a má jmenovitou průřezovou plochu 93 mm². Model 3D lana se vytvořil v programu Inventor. Kruhový průřez lana byl rozdělen dohromady na 12 výsečí po 30°. Rozdělení bylo provedeno z důvodu budoucího definování kontaktních ploch. Oslabení bylo namodelováno v délce 50 mm v různých alternativách. K přiblížení reálné korozi je tento přechod plynulý. Poté se lano nejprve po částech vyexportovalo z programu Inventor jako 3D tělesa a následně naimportovalo do programu Abaqus.

V programu Abaqus zbývalo nadefinovat parametry chování. Jako první se stanovily materiálové vlastnosti. Materiál předpínacích lan je nízkouhlíková ocel, pro kterou výrobce poskytl pracovní diagram. Pro výpočet bylo provedeno zjednodušení pracovního diagramu. Chování materiálu bylo uvažováno jako izotropní elasticko-plastické s lineárním zpevněním.



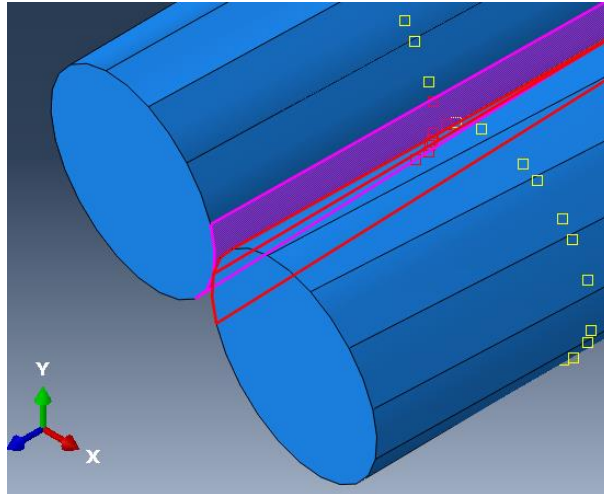
Obr. 31 Uvažovaný pracovní diagram

Byla zadána hodnota Youngova modulu pružnosti $E=198$ GPa a Poissonova čísla $\mu=0,3$. Při úrovni napětí $\sigma=1694$ MPa se materiál začíná plastifikovat. Následně dochází k lineárnímu zpevnění do hodnoty $\sigma=1909$ MPa, při kterém vzniká trvalá plastická deformace. Jednotlivé dráty se vzájemně dotýkají a bylo potřeba nastavit kontaktní plochy.

Kontakt mezi jednotlivými dráty byl nastaven pomocí funkce „surface to surface“. K tomu bylo využito rozdělení povrchu drátu, které umožnilo vybrat dotýkající se plochy mezi dráty. Parametry kontaktu byly určeny normálovým a tangenciálním chováním. V tangenciálním směru bylo uvažováno tření.

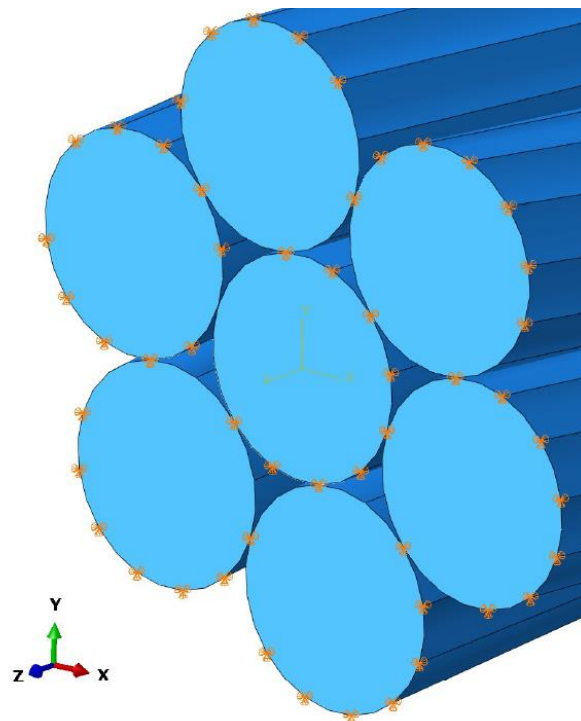


Koeficient tření mezi dráty byl zvolen 0,4. Normálové chování drátu bylo popsáno pomocí funkce „hard contact“.



Obr. 32 Kontakt mezi dvěma dráty

V dalším kroku byly nedefinovány okrajové podmínky a zatěžování. Pro každou plochu okraje lana byl omezen posun ve všech směrech.



Obr. 33 Nastavené okrajové podmínky

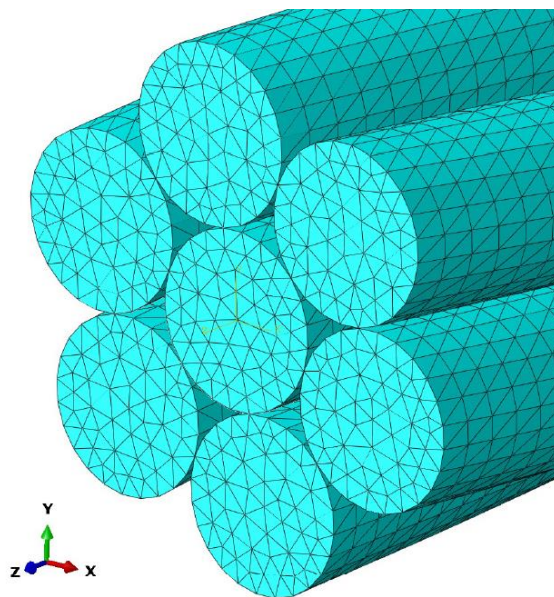


Zatěžování bylo provedeno postupným posouváním jedné z podpor. Velikost celkového posunu jsem stanovil z předpokladu, že u nepoškozeného lana nebude vznikat plastická deformace.

$$\begin{aligned}\sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \sigma &= E \cdot \frac{u}{L} \\ u_z &= \frac{\sigma \cdot L}{E} \\ u_z &= \frac{1694 \cdot 300}{198 \cdot 10^3} \\ u_z &= 2,56 \text{ mm} \cong 2,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Numerické modely byly zatíženy posunem podpory $u_z=2,5$ mm. Zatížení bylo provedeno v postupných krocích po 0,1 mm.

Na závěr zbývalo v modelu nastavit výpočetní síť. Vzhledem ke složité geometrii byla použita trojúhelníková buňka. Pro všechny modely byla zvolena velikost buňky 0,8 mm.



Obr. Nastavená výpočetní síť



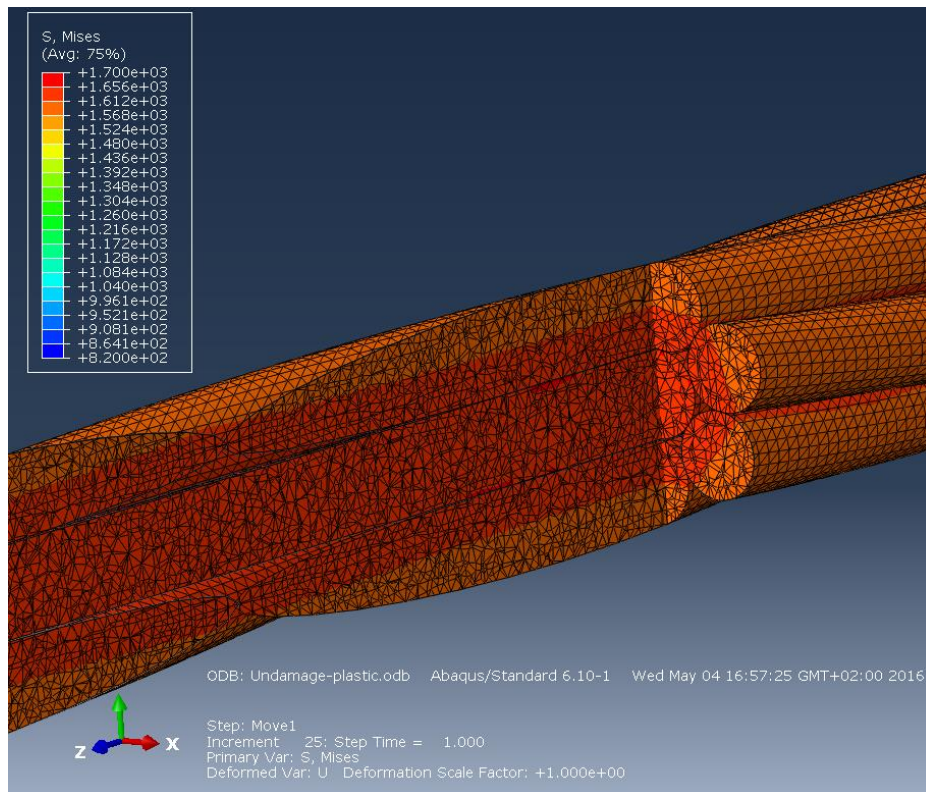
4.2 Výsledky numerických modelů

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky numerických modelů. Přípustné plastické přetváření je vyznačeno pomocí zelené barvy, nepřípustné plastické přetváření pomocí světle červené barvy. Napětí je stanoveno dle Missesovy podmínky plasticity. Na obrázcích jsou vyznačeny stavy maximálních dosažených přetvoření.

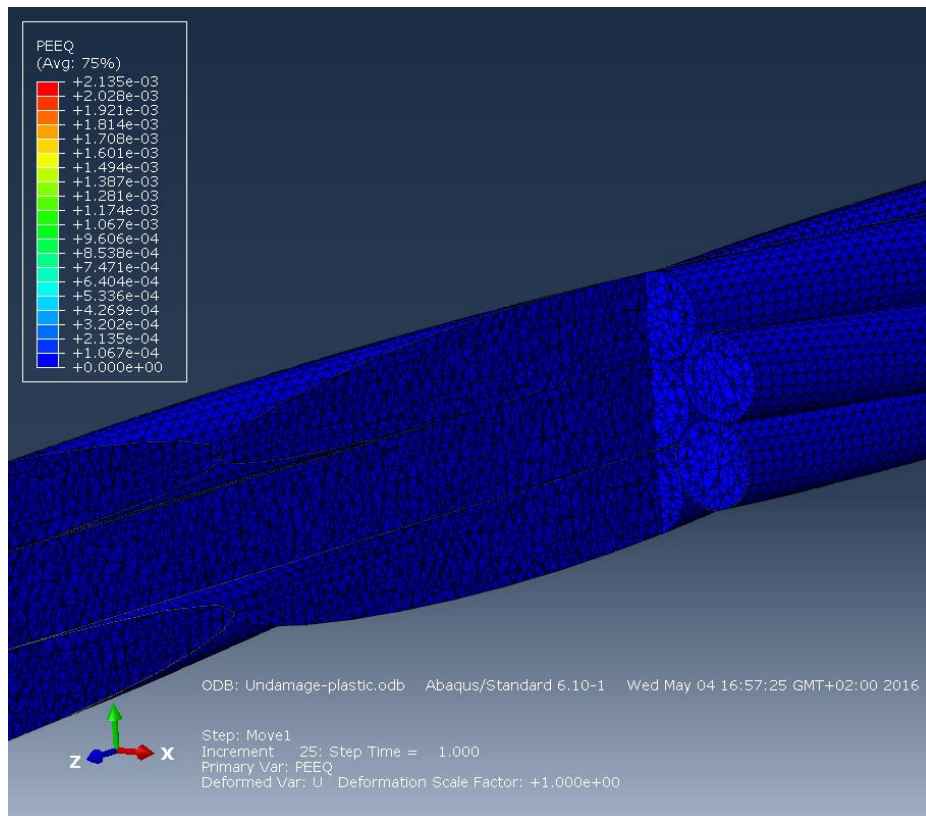
4.2.1 Výsledky-neoslabené lano

Deformace [mm]	Poměrné přetvoření $\epsilon[-]$	$\sigma_{\text{neosl.}}$ [MPa]	Plastická deformace $\epsilon_p[-]$
0,1	3,333E-04	66	0
0,2	6,667E-04	133	0
0,3	1,000E-03	199	0
0,4	1,333E-03	265	0
0,5	1,667E-03	331	0
0,6	2,000E-03	397	0
0,7	2,333E-03	464	0
0,8	2,667E-03	530	0
0,9	3,000E-03	596	0
1	3,333E-03	662	0
1,1	3,667E-03	728	0
1,2	4,000E-03	794	0
1,3	4,333E-03	861	0
1,4	4,667E-03	927	0
1,5	5,000E-03	994	0
1,6	5,333E-03	1060	0
1,7	5,667E-03	1126	0
1,8	6,000E-03	1192	0
1,9	6,333E-03	1258	0
2	6,667E-03	1324	0
2,1	7,000E-03	1390	0
2,2	7,333E-03	1456	0
2,3	7,667E-03	1522	0
2,4	8,000E-03	1588	0
2,5	8,333E-03	1652	0

Tab. 1 Výsledky neoslabeného lana



Obr. 34 Rozložené napětí u neoslabeného lana při $\epsilon=8,333E-03$



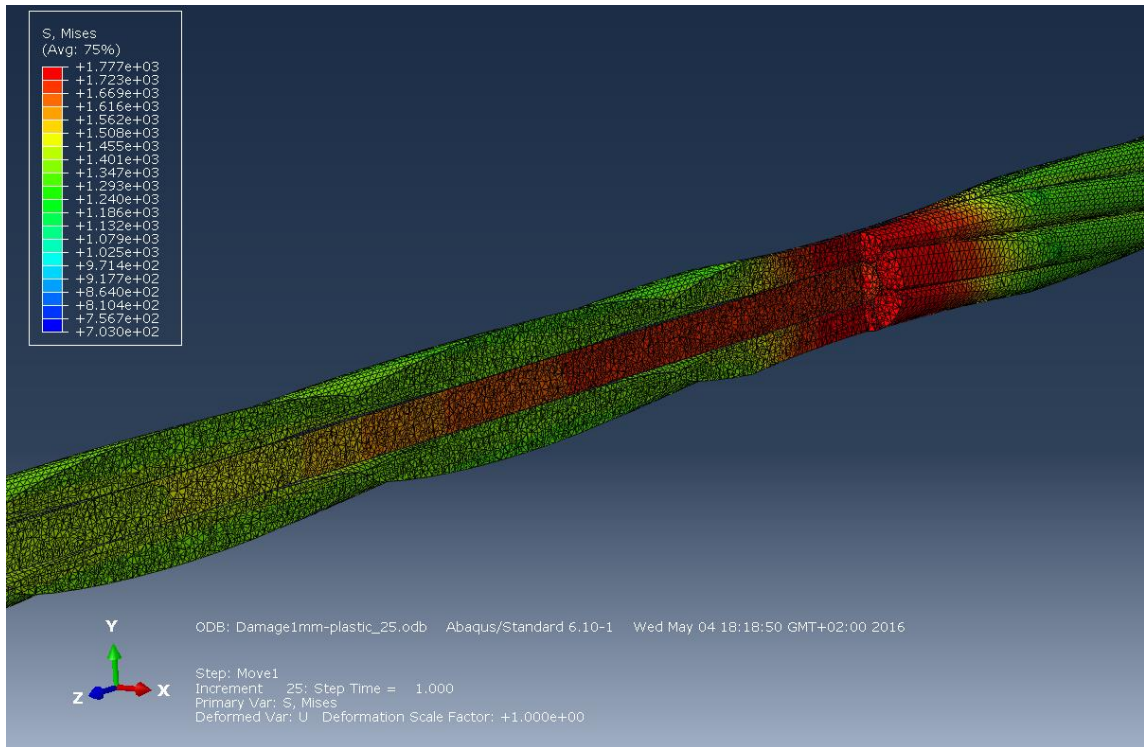
Obr. 35 Plastická deformace u neoslabeného lana při $\epsilon=8,333E-03$



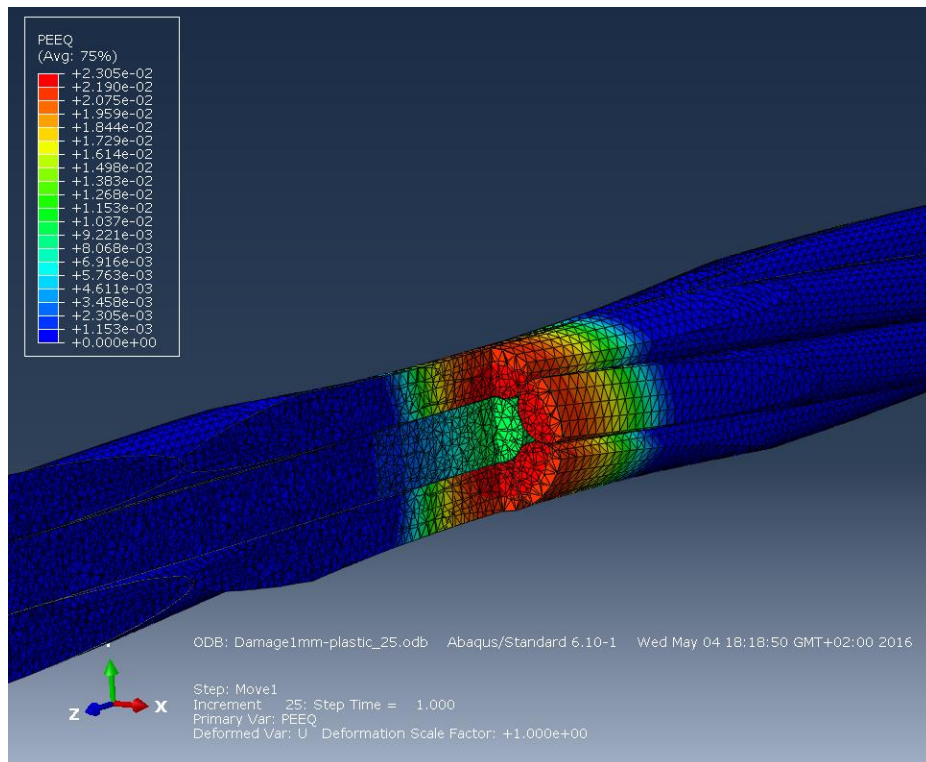
4.2.2 Výsledky-oslabení 1 mm

Deformace [mm]	Poměrné přetvoření ϵ [-]	$\sigma_{osl.1\text{ mm}}$ [MPa]	Plastická deformace ϵ_p [-]
0,1	3,333E-04	79	0
0,2	6,667E-04	159	0
0,3	1,000E-03	239	0
0,4	1,333E-03	319	0
0,5	1,667E-03	400	0
0,6	2,000E-03	482	0
0,7	2,333E-03	564	0
0,8	2,667E-03	646	0
0,9	3,000E-03	729	0
1	3,333E-03	813	0
1,1	3,667E-03	897	0
1,2	4,000E-03	981	0
1,3	4,333E-03	1065	0
1,4	4,667E-03	1148	0
1,5	5,000E-03	1227	0
1,6	5,333E-03	1302	0
1,7	5,667E-03	1373	0
1,8	6,000E-03	1440	0
1,9	6,333E-03	1513	0
2	6,667E-03	1611	0
2,1	7,000E-03	1694	0
2,2	7,333E-03	1707	3,659E-03
2,3	7,667E-03	1726	9,134E-03
2,4	8,000E-03	1747	1,498E-02
2,5	8,333E-03	1770	2,140E-02

Tab. 2 Výsledky oslabení 1 mm



Obr. 36 Oslabení 1 mm-rozložení napětí při $\epsilon=8,333E-03$



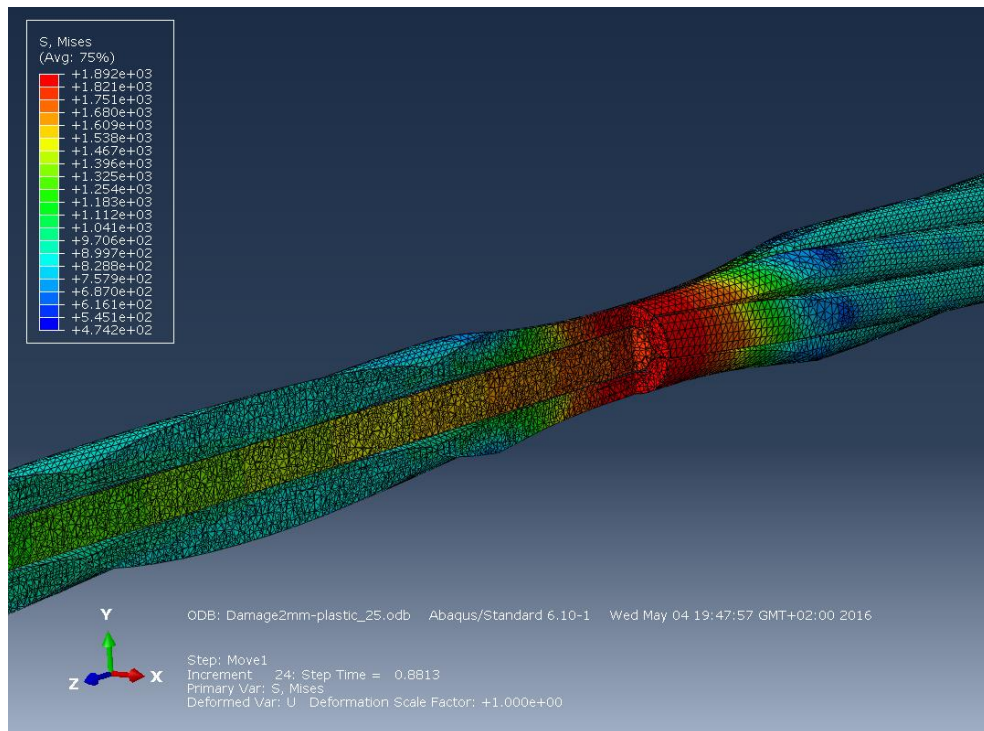
Obr. 37 Oslabení 1 mm-plastická deformace při $\epsilon=8,333E-03$



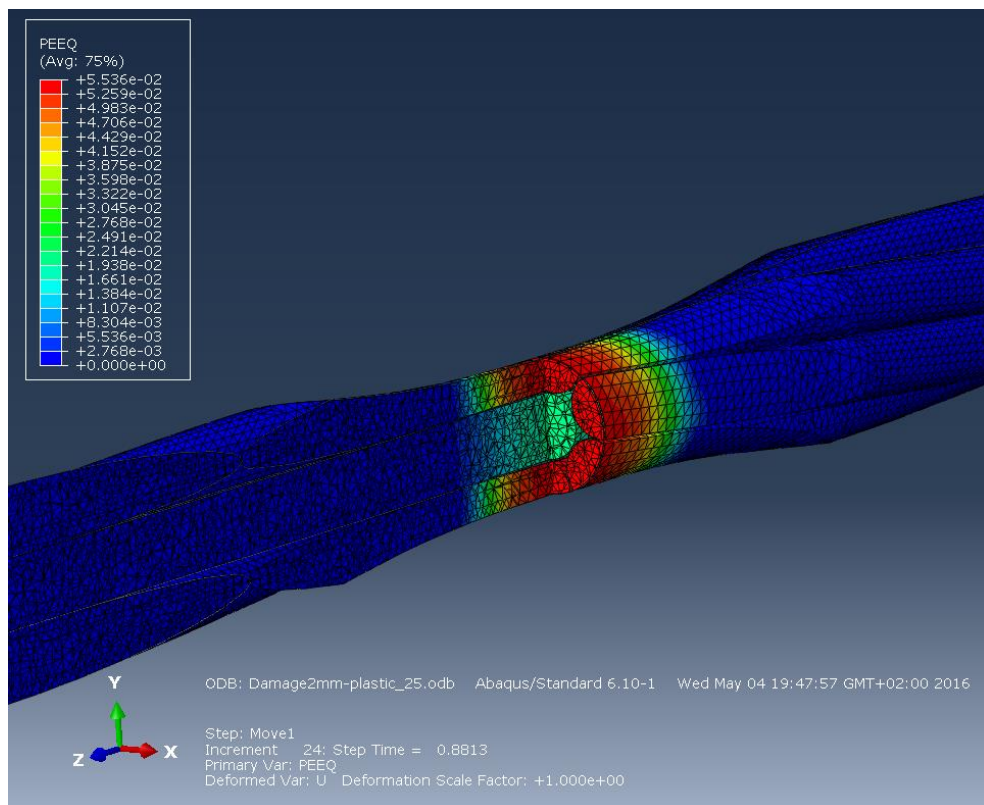
4.2.3 Výsledky-oslabení 2 mm

Deformace [mm]	Poměrné přetvoření ϵ [-]	$\sigma_{osl.2\text{ mm}}$ [MPa]	Plastická deformace ϵ_p [-]
0,1	3,333E-04	113	0
0,2	6,667E-04	228	0
0,3	1,000E-03	343	0
0,4	1,333E-03	459	0
0,5	1,667E-03	576	0
0,6	2,000E-03	694	0
0,7	2,333E-03	814	0
0,8	2,667E-03	935	0
0,9	3,000E-03	1058	0
1	3,333E-03	1182	0
1,1	3,667E-03	1309	0
1,2	4,000E-03	1437	0
1,3	4,333E-03	1566	0
1,4	4,667E-03	1694	0
1,5	5,000E-03	1710	5,210E-03
1,6	5,333E-03	1728	1,055E-02
1,7	5,667E-03	1747	1,629E-02
1,8	6,000E-03	1775	2,468E-02
1,9	6,333E-03	1802	3,256E-02
2	6,667E-03	1828	3,999E-02
2,1	7,000E-03	1839	4,849E-02
2,2	7,333E-03	1868	5,449E-02
2,3	7,667E-03	1908	6,288E-02
2,4	8,000E-03	1909	9,083E-02
2,5	8,333E-03	1909	1,264E-01

Tab. 3 Výsledky oslabení 2 mm



Obr. 38 Oslabení 2 mm-rozložení napětí při $\epsilon=7,333E-03$



Obr. 39 Oslabení 2 mm-plastická deformace při $\epsilon=7,333E-03$

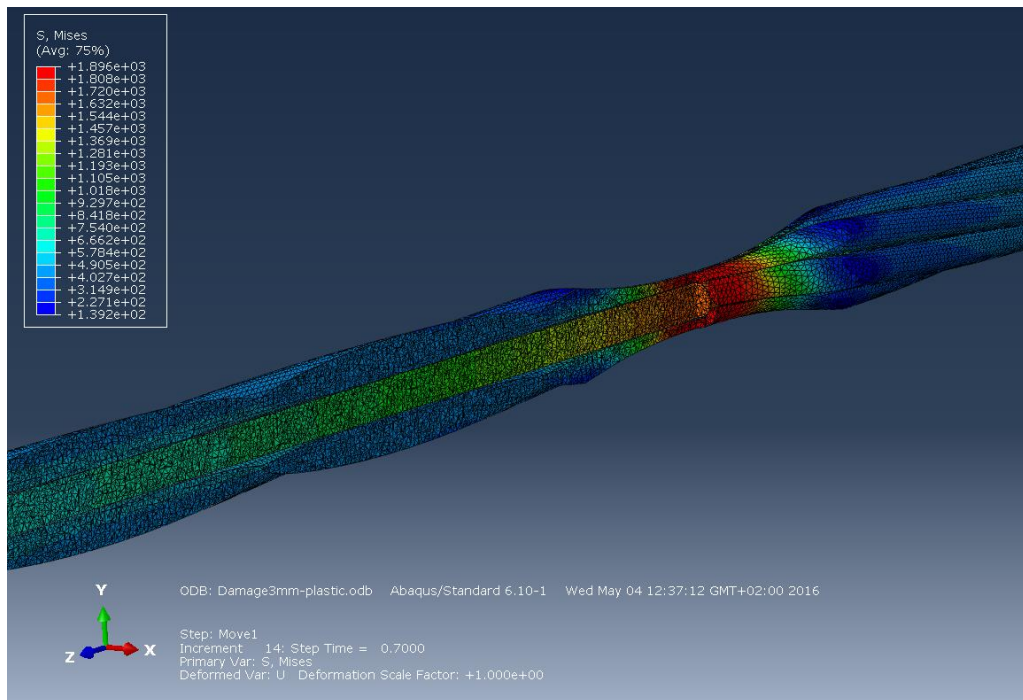


4.2.4 Výsledky-oslabení 3 mm

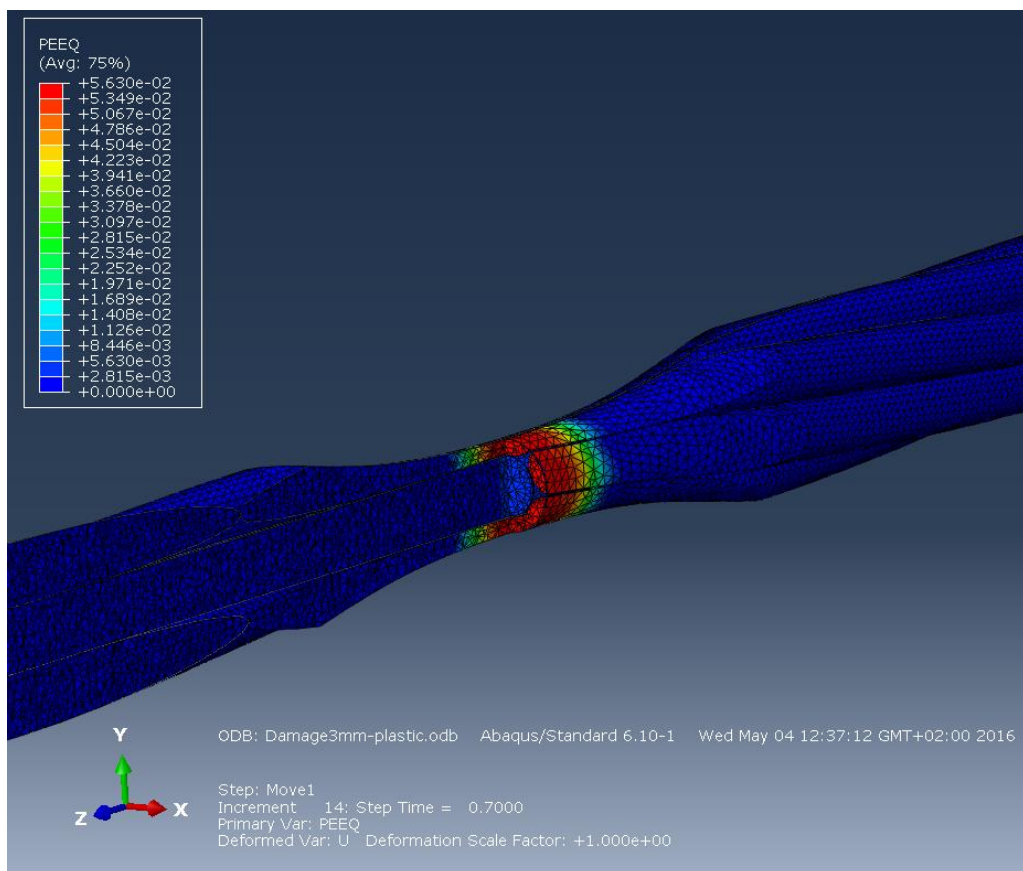
U oslabení 3 mm se velikost posunu snížila z 2,5 mm na 2 mm z důvodu vzniku velkých plastických přetvoření.

Deformace [mm]	Poměrné přetvoření ϵ [-]	$\sigma_{osl.3\text{ mm}}$ [MPa]	Plastická deformace ϵ_p [-]
0,1	3,333E-04	214	0
0,2	6,667E-04	445	0
0,3	1,000E-03	686	0
0,4	1,333E-03	932	0
0,5	1,667E-03	1184	0
0,6	2,000E-03	1439	0
0,7	2,333E-03	1695	0
0,8	2,667E-03	1714	5,388E-03
0,9	3,000E-03	1738	1,197E-02
1	3,333E-03	1764	1,921E-02
1,1	3,667E-03	1792	2,700E-02
1,2	4,000E-03	1822	3,532E-02
1,3	4,333E-03	1853	4,421E-02
1,4	4,667E-03	1892	5,501E-02
1,5	5,000E-03	1909	7,199E-02
1,6	5,333E-03	1909	9,639E-02
1,7	5,667E-03	1909	1,243E-01
1,8	6,000E-03	1909	1,557E-01
1,9	6,333E-03	1909	1,948E-01
2	6,667E-03	1909	2,544E-01

Tab. 4 Výsledky oslabení 3 mm



Obr. 40 Oslabení 3 mm-rozložení napětí při $\epsilon=4,667E-03$

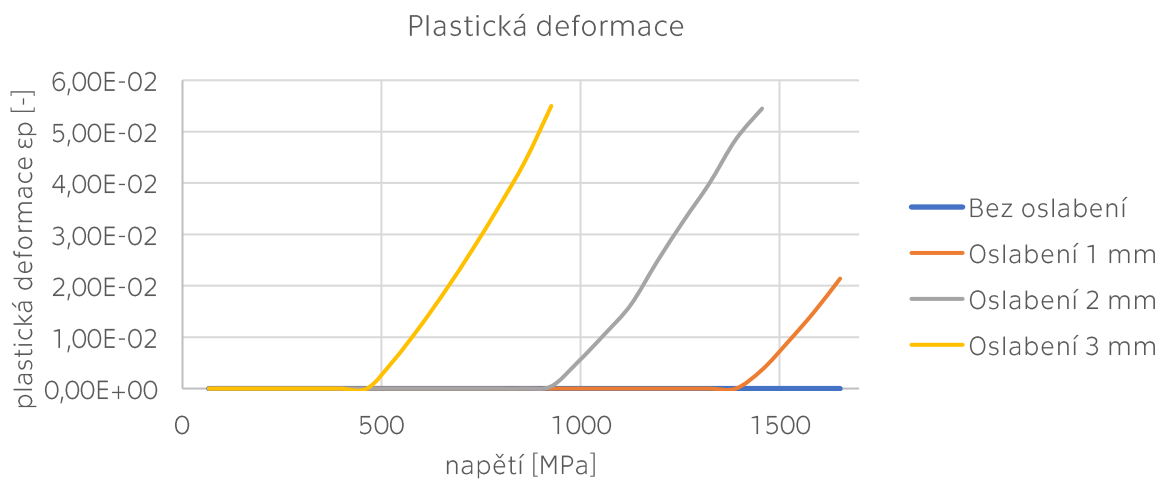


Obr. 41 Oslabení 3 mm-plastická deformace při $\epsilon=4,667E-03$

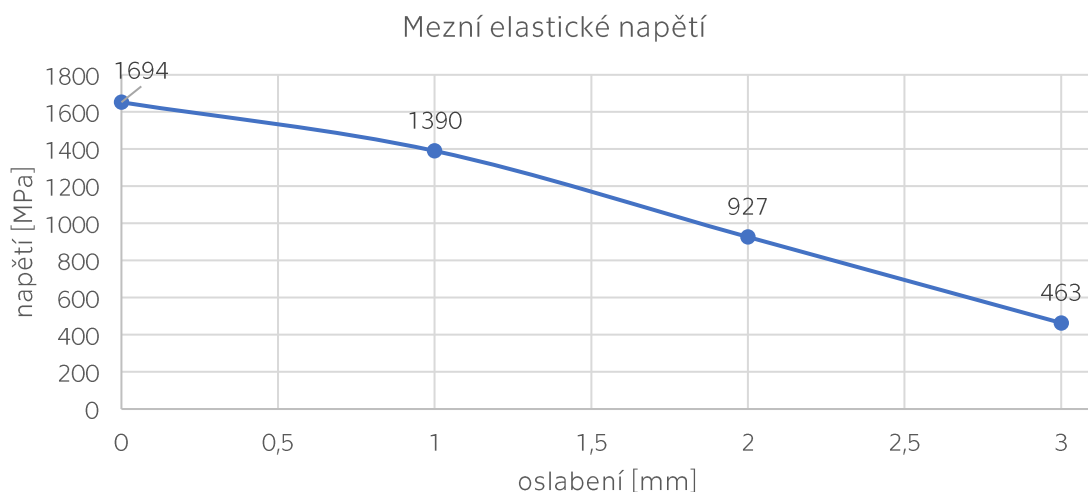


4.3 Vyhodnocení numerických modelů

Na základě výsledků numerických modelů bylo možné vyhodnotit chování předpínacího lana v místě oslabení. Velikost napětí v předpínací výztuži v konstrukcích se může pohybovat okolo hranice meze pružnosti (přibližně 1500 MPa). S rostoucí mírou oslabení dochází ke snížení elastických vlastností, které přinášejí trvalé plastické deformace materiálu. Z grafu plastické deformace lze stanovit mezní oslabení průřezu, při kterém materiál dosáhne meze pružnosti. Stanovené grafy jsou pouze velmi orientační a vycházejí ze zjednodušeného korozního působení.



Obr. 42 Plastická deformace



Obr. 43 Mezní elastické napětí



Ve výpočetních modelech byla sledována závislost mezi napětím neoslabeného a oslabeného lana. K porovnání byl zaveden pomocný koeficient K . Pomocí koeficientu K lze určit velikost napětí v závislosti na oslabení průřezu. Pro výpočet byly uvažovány pouze plasticky přípustné výsledky.

$$K = \frac{\sigma_{neosl.}}{\sigma_{oslab.}} [-]$$

Oslabení 1 mm		
$\sigma_{neosl.}$ [MPa]	$\sigma_{osl.1\text{ mm}}$ [MPa]	koeficient K [-]
66	79	1,19
132	159	1,20
199	238	1,20
265	319	1,20
331	400	1,21
397	482	1,21
463	564	1,22
530	646	1,22
596	729	1,22
662	813	1,23
728	897	1,23
794	981	1,23
860	1065	1,24
927	1148	1,24
994	1227	1,23
1060	1302	1,23
1126	1373	1,22
1192	1440	1,21
1258	1513	1,20
1324	1610	1,22
1390	1694	1,22
1456	1707	1,17
1522	1726	1,13
1588	1747	1,10
1652	1770	1,07

Tab. 5 Koeficient K -oslabení 1 mm

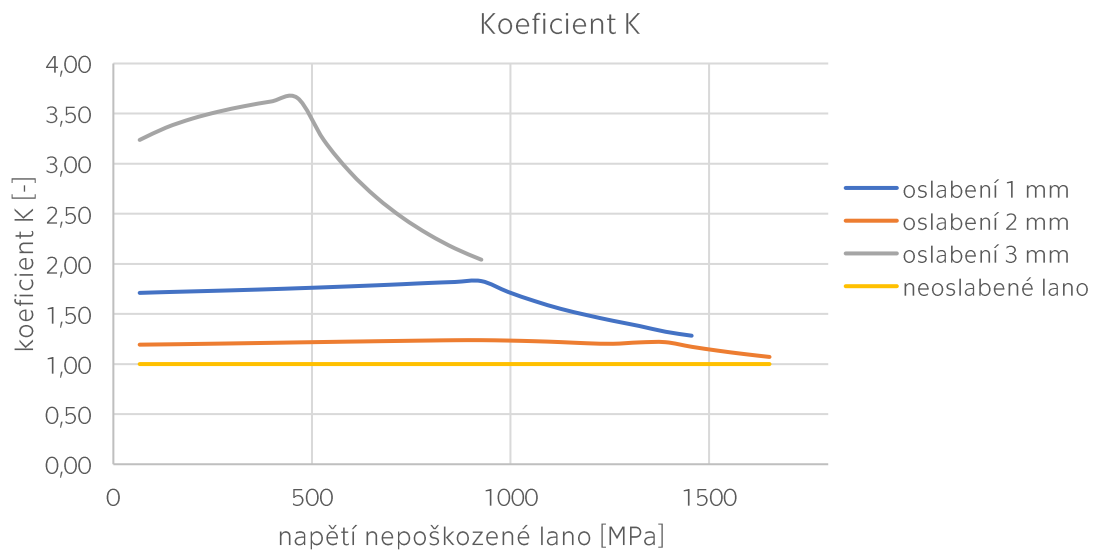


Oslabení 2 mm		
$\sigma_{\text{neosl.}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{osl.2mm}}$ [MPa]	koeficient K [-]
66	113	1,71
132	228	1,72
199	343	1,73
265	459	1,73
331	576	1,74
397	694	1,75
463	814	1,76
530	935	1,77
596	1058	1,78
662	1182	1,79
728	1309	1,80
794	1437	1,81
860	1566	1,82
927	1694	1,83
994	1710	1,72
1060	1728	1,63
1126	1747	1,55
1192	1775	1,49
1258	1802	1,43
1324	1828	1,38
1390	1839	1,32
1456	1868	1,28

Tab. 6 Koeficient K-oslabení 2 mm

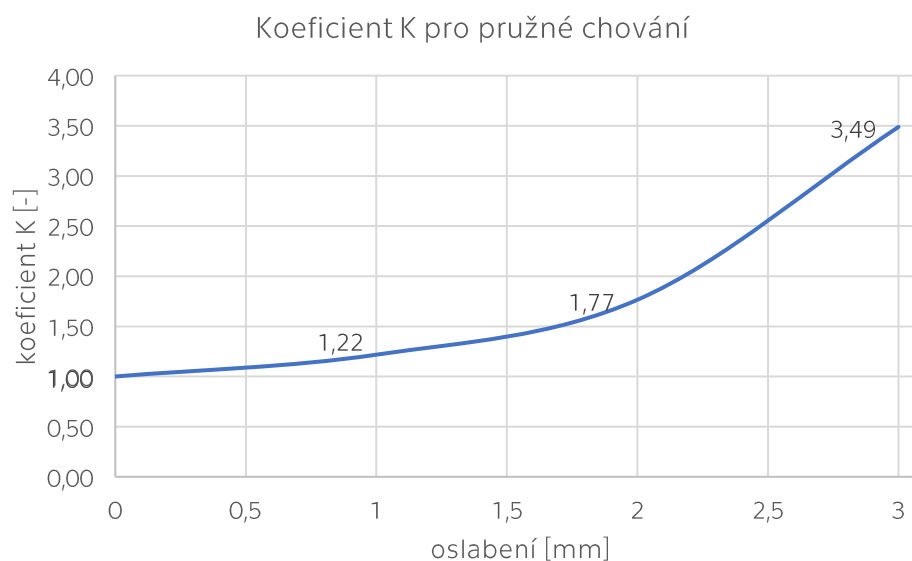
Oslabení 3 mm		
$\sigma_{\text{neosl.}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{osl.3mm}}$ [MPa]	koeficient K [-]
66	214	3,24
132	445	3,36
199	686	3,45
265	932	3,52
331	1184	3,58
397	1439	3,62
463	1695	3,66
530	1714	3,24
596	1738	2,92
662	1764	2,66
728	1792	2,46
794	1822	2,29
860	1853	2,15
927	1892	2,04

Tab. 7 Koeficient K-oslabení 3 mm



Obr. 44 Průběh koeficientu K

Ze získaných výsledků byl vynesena graf, který uvádí vztah mezi napětím nepoškozeného lana a koeficientu K. Lze pozorovat, že se koeficient K chová přibližně konstantě v elastické oblasti a následně v plastické oblasti jeho hodnota klesá. Což odpovídá očekávanému chování. Pro pružné chování materiálu lze vyneset graf závislosti koeficientu K na oslabení. Na základě získaných výsledků numerických modelů byl proveden návrh oslabení pro experiment. Opracování předpínacích lan bylo navrženo v alternativě 1 mm a 2 mm.



Obr. 45 Koeficient K pro pružné chování



5 Návrh experimentu pro měření metodou MMM

5.1 Teoretická příprava experimentu

Měření pomocí metody MMM se doposud nepoužilo pro diagnostikování koroze předpínací výztuže v předpjatém betonu, proto byl navržen experiment k ověření této metody. Cílem bylo navrhnout sestavu vzorků, u kterých bude možné získat co nejvíce naměřených dat pro různé varianty předpjatých konstrukcí, různé korozní poškození a různé stavy napjatosti.

Pro experiment byly použity předpjaté betonové trámce. Na začátku bylo nutné rozhodnout, kolik vzorků bude potřeba. Předpokladem bylo vyrobit vzorky obou technologií předpjatého betonu. Vzhledem k časovému a technologickému omezení nebylo možné vyrobit předem předpjaté vzorky, ale pouze dodatečně předpjaté. Jako předpínací výztuž se zvolila sedmidrátová lana o průměru 12,5 mm s pevností 1860 MPa, ačkoliv z historického hlediska mostních konstrukcí by bylo vhodné vyrobit také vzorky s předpínacími kabely. Jejich použití však bylo limitováno komplikacemi při jejich zajištění. Dalším rozhodujícím faktorem byla volba materiálu chrániček pro předpínací výztuž, které se zvolily kovové a plastové.

K simulaci reálného korozního oslabení předpínacích lan nebyl dostatek času. V daném případě byla koroze simulována pomocí mechanického opracování, které nahradí úbytek materiálu způsobovaný dlouhodobým působením koroze. K porovnání různých korozních oslabení bylo na základě numerických výpočetních modelů vybráno oslabení 1 mm a 2 mm.

V předpjatých konstrukcích se kromě předpínací výztuže vyskytuje i konstrukční ocelová výztuž. Její funkce není primárně nosná, ale její přítomnost může do určité míry ovlivňovat měření. Rozhodujícím faktorem byla tloušťka betonové krycí vrstvy, která vytváří značnou překážku pro měření. Všechny vzorky mají stejné krytí předpínací výztuže 50 mm, které odpovídá hodnotě krytí u starších mostních konstrukcí. Pro další alternativu krytí bude betonový trámec měřený i ze boční strany.

Závěrem zbývalo vyřešit stavy různých úrovní napjatosti. K tomu bylo využito počáteční částečné předeprnutí výztuže doplněné následně provedenou ohybovou zkouškou. Na základě těchto skutečností bylo celkem pro tento experiment navrženo 8 různých betonových trámců.



Přehled jednotlivých vzorků:

Vzorek č.	Oslabení	Chránička	Kovová výztuž
A	1 mm	kovová chránička	ano
B	1 mm	kovová chránička	ne
C	1 mm	PE chránička	ano
D	1 mm	PE chránička	ne
E	2 mm	kovová chránička	ano
F	2 mm	kovová chránička	ne
G	2 mm	PE chránička	ano
H	2 mm	PE chránička	ne

5.2 Statický návrh vzorků

Při stanovení obecného předpokladu a počtu vzorků bylo nutné vyřešit statický a konstrukční návrh. Pro betonové trámce byl navržen obdélníkový průřez. Vzorky se nejprve částečně předeplnily na hodnotu 600 MPa pomocí předpínací výztuže Y1860F7 12,5 s pevností 1860 MPa. Následně bylo navrženo postupné zatěžování pomocí ohybové zkoušky, proto se předpjaté betonové trámce také vyztužily na ohybové a smykové namáhání. Ohybové namáhání klasické kovové výztuže by mohlo ovlivnit výsledky měření, proto se použila kompozitní skelná výztuž. Chování betonu v tlaku se uvažovalo elastické s lineárním průběhem. Pro trámce se pro výpočet použil beton C45/55. Charakteristická pevnost v tlaku se navíc zvýšila o 8 MPa, aby se lépe vystihla skutečná pevnost směsi. U předpjatých konstrukcí se vyskytuje i konstrukční kovová výztuž, která byla přidána do určitých vzorků ke kompozitní skelné výztuži v 30 mm dlouhých dílcích. Kovová výztuž se tím pádem nebude přetvářet a vystihne lépe chování konstrukční výztuže v předpjatém betonu. Smyková výztuž musela být vyrobena z klasické výztuže, protože kompozitní výztuž je netvárná. Aby smyková výztuž neovlivňovala měření, byl zvolen způsob zatěžování pomocí čtyřbodového ohybu. Výhoda této zkoušky spočívá v příznivém rozložení vnitřních sil. Maximální moment je konstantní na vzdálenosti zatěžovacích sil a zároveň zde není posouvající síla. Vzdálenost zatěžovacích sil se stanovila na 700 mm. Na tomto úseku bude možné provádět měření neovlivněné kovovou smykovou výztuží.

Všechny vzorky byly navrženy staticky stejně. Vzorky mají hlavní nosnou ohybovou výztuž tvořenou 2 pruty z kompozitní skelné výztuže. Smykové namáhání přenáší klasická ocelová výztuž B500B. Předběžné posouzení betonového trámce bylo provedeno dle ČSN EN 1992-2 (736208). Návrh geometrie vychází z předpokládaných (charakteristických) materiálových vlastností, avšak tyto vlastnosti byly později upraveny dle reálně naměřených zkoušek materiálů. Počáteční návrh měl za úkol zjistit orientační únosnost vzorků.

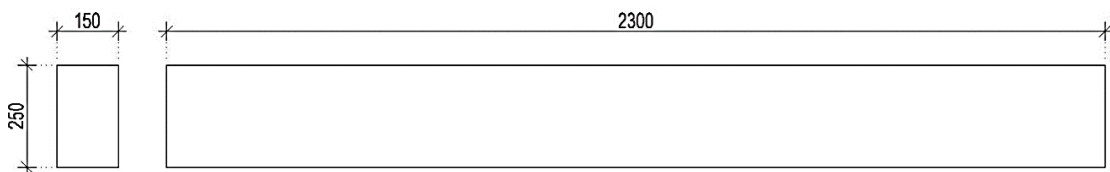


Jako první byla navržena geometrie vzorku a pro její optimální stanovení bylo využito excelové tabulky, ve které bylo možné měnit jednotlivé parametry. Pro stanovenou geometrii je zde uveden statický výpočet.

5.2.1 Navržená geometrie vzorků

Byla navržena geometrie následujících rozměrů:

- šířka $B=150$ mm
- výška $H=250$ mm
- délka $L=2300$ mm



Obr. 46 Navržená geometrie vzorků

5.2.2 Materiálové charakteristiky

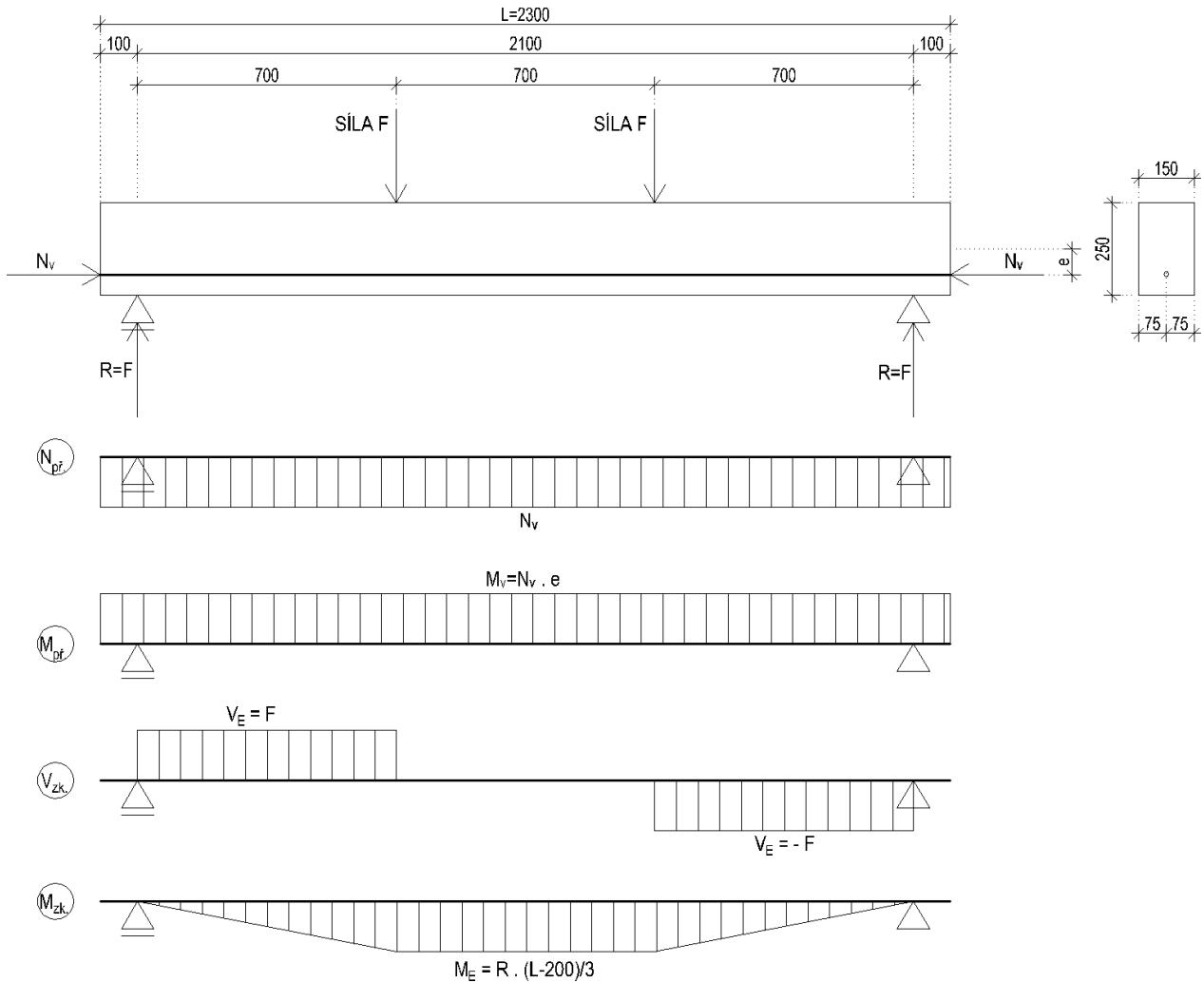
Předpínací výztuž Y1860F7	
průměr d_p	12,5 mm
jmenovitá plocha A_p	93 mm ²
pevnost f_{pk}	1860 MPa
vnesení částečného předpětí f_v	600 MPa
uvažovaná pevnost $f_p=f_{pk}-f_v$	1260 MPa
krytí c_p	50 mm
Beton C45/55	
pevnost f_{ck}	45 MPa
uvažovaná pevnost $f_c=f_{ck}+8$	53 MPa
Kompozitní skelná výztuž	
pevnost f_n	1050 MPa
krytí c_n	28 mm
Kovová výztuž B500B	
pevnost f_y	500 MPa
krytí c_y	20 mm

Tab. 8 Materiálové charakteristiky



5.2.3 Vnitřní síly

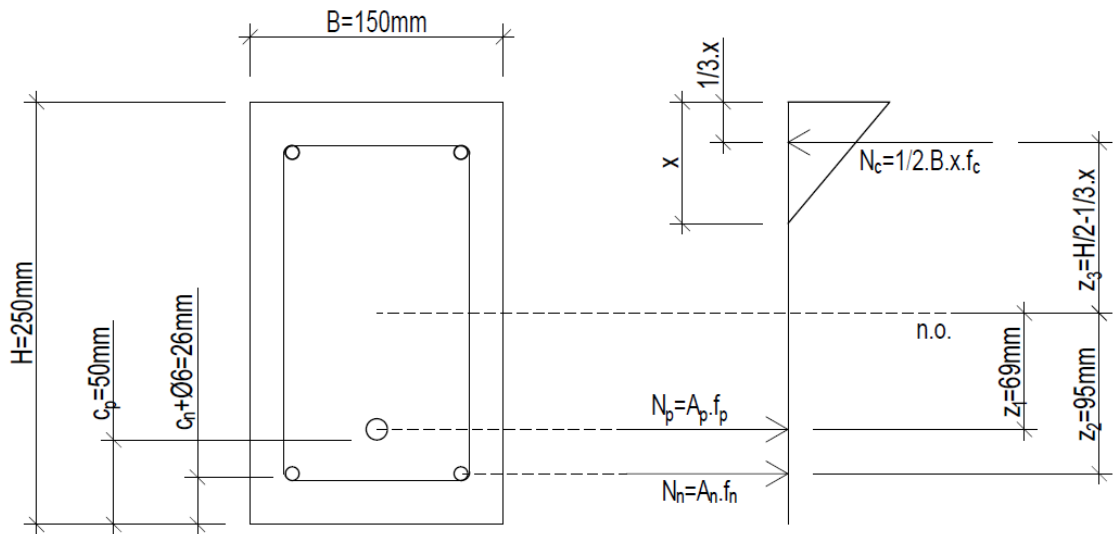
Účinek vlastní tíhy se vzhledem k malému příspěvku zanedbá.



Obr. 47 Vnitřní síly

5.2.4 Ohybová únosnost

Pro vzorky bylo nutné určit maximální ohybový moment únosnosti, ze kterého následně byla stanovena maximální možná zatěžovací síla. Pomocí této síly byl proveden návrh ohybové zkoušky. Výpočet ohybové únosnosti se provedl dle ČSN EN 1992-2 (736208).



Obr. 48 Rozdělení sil na průřezu

Postup výpočtu:

- a) velikosti síly nekovové výztuže
návrh 2 prutů $d_n=8$ mm

$$A_n = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 101 \text{ mm}^2$$

$$N_n = A_n \cdot f_n = 101 \cdot 1050 \cdot \frac{1}{1000} = 105,6 \text{ kN}$$

- b) velikost síly předpínací výztuže

$$A_p = 93 \text{ mm}^2$$

$$N_p = f_p \cdot A_p = 1260 \cdot 10^{-3} = 117,18 \text{ kN}$$

- c) stanovení velikosti tlačené části x

$$N_c = N_p + N_n$$

$$\frac{1}{2} \cdot x \cdot B \cdot f_c = N_p + N_n$$

$$x = \frac{2 \cdot (N_p + N_n)}{B \cdot f_c} = \frac{2 \cdot (105,6 + 117,18)}{150 \cdot 53} \cdot 10^3 = 56 \text{ mm}$$



d) ohybová únosnost

$$z_1 = \frac{H}{2} - c_p - \frac{d_p}{2} = \frac{250}{2} - 50 - \frac{12,5}{2} = 69 \text{ mm}$$

$$z_2 = \frac{H}{2} - c_n - \frac{d_n}{2} = \frac{250}{2} - 26 - \frac{8}{2} = 95 \text{ mm}$$

$$z_3 = \frac{H}{2} - \frac{x}{3} = \frac{250}{2} - \frac{56}{3} = 106 \text{ mm}$$

$$M_R = N_p \cdot z_1 + N_n \cdot z_2 + N_c \cdot z_3$$

$$M_R = 117,18 \cdot 69 \cdot 10^{-3} + 105,6 \cdot 95 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{2} \cdot 56 \cdot 150 \cdot 53 \cdot 106 \cdot 10^{-6} = 41,77 \text{ kNm}$$

e) vyjádření zatěžovací síly

$$M_R = M_E$$

$$M_R = R \cdot \frac{(L - 200)}{3}$$

$$R = \frac{3 \cdot M_R}{(L - 200)}$$

$$R = F = \frac{3 \cdot 41,77}{(2300 - 200) \cdot 10^{-3}} = 59,7 \text{ kN}$$

$$F_{\text{celkem}} = 2 \cdot F = 59,7 \cdot 2 = 119,4 \text{ kN}$$

Síla $F_{\text{celkem}}=119,4 \text{ kN}$ je reálná pro zatěžovací zkoušku do porušení.

5.2.5 Smyková únosnost

Pro stanovenou maximální zatěžovací sílu $F=V_E=59,7 \text{ kN}$ se provedl návrh smykové výztuže dle ČSN EN 1992-2 (736208).

a) únosnost tlakové diagonály

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{53}{250}\right) = 0,49$$

$$\cot \theta = 1,4$$

$$b_w = B = 150 \text{ mm}$$

$$z = H - c_n - \frac{d_n}{2} - \frac{x}{3} = 250 - 26 - \frac{8}{2} - \frac{56}{3} = 201 \text{ mm}$$

$$V_{R,max} = v \cdot f_c \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + (\cot \theta)^2} = 0,49 \cdot 53 \cdot 150 \cdot 201 \cdot \frac{1,4}{1 + 1,4^2} \cdot 10^{-3} = 370,3 \text{ kN}$$

$$V_{R,max} \geq V_E$$

$$370,3 \text{ kN} \geq 59,7 \text{ kN}$$

Únosnost tlakové diagonály je dostatečná.



b) návrh smykové výztuže

Návrh třmíneků $d_{sw}=6$ mm, střížnost $n=2$

$$A_{sw} = \frac{n \cdot \pi \cdot d_{sw}^2}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6^2}{4} = 57 \text{ mm}^2$$

$$\cot \theta = 1,4$$

$$z = 201 \text{ mm}$$

$$s_{max} \leq \frac{A_{sw} \cdot f_y}{V_E} \cdot z \cdot \cot \theta = \frac{57 \cdot 500}{59,7} \cdot 201 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} = 134 \text{ mm}$$

Návrh třmíneků $s=100$ mm

$$s_{max} \geq s$$

$$134 \text{ mm} \geq 100 \text{ mm}$$

Pro betonové vzorky byly navrženy dvoustřížné třmínky po 100 mm.

5.2.6 Oblast kotevní oblasti

Prověření kotevní oblasti trámců bylo provedeno pouze zjednodušenou formou. Ve výpočtu se uvažovala maximální síla v předpínacím laně přenášená kotevní deskou o rozměrech $a=150$ mm a $b=100$ mm do betonu. Deska byla vyrobena z plechu tl. 18 mm s dostatečnou tuhostí zabraňující vlastní deformaci.

$$A_d = a \cdot b = 150 \cdot 100 = 15 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$N_{p,max} = f_p \cdot A_p = 1860 \cdot 93 \cdot 10^{-3} = 172,9 \text{ kN}$$

$$\sigma_{tlak} = \frac{N_{p,max}}{A_d} = \frac{172,9}{15 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}} = 11,53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tlak} < f_c$$

$$11,53 \text{ MPa} < 53 \text{ MPa}$$

Tlak pod kotevní oblastí dosahuje hodnoty 22 % pevnosti betonu v tlaku. Vzhledem k malé hodnotě napětí nebylo navrženo žádné dodatečné vyztužení této oblasti.



5.2.7 Napětí v průřezu

Pro předpjatý betonový trámec bylo posouzeno napětí na průřezu po vnesení předpínací síly.

a) Průřezové charakteristiky

$$\begin{aligned}A &= B \cdot H = 150 \cdot 250 = 37,5 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\I_y &= \frac{1}{12} \cdot B \cdot H^3 = \frac{1}{12} \cdot 150 \cdot 250^3 = 1,953 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \\W_e &= \frac{I_y}{\frac{H}{2}} = \frac{1,953 \cdot 10^8}{\frac{250}{2}} = 1,563 \cdot 10^6 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

b) Napětí po předpětí

$$\begin{aligned}f_v &= 600 \text{ MPa} \\e &= \frac{H}{2} - c_p - \frac{d_p}{2} = \frac{250}{2} - 50 - \frac{12,5}{2} = 69 \text{ mm} \\N_v &= f_v \cdot A_p = -600 \cdot 93 \cdot 10^{-3} = -55,8 \text{ kN} \\M_v &= N_v \cdot e = -55,8 \cdot 69 \cdot 10^{-3} = -3,9 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\sigma_v^h = \frac{N_v}{A} - \frac{M_v}{W_e} = -\frac{55,8}{37,5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}} + \frac{3,9}{1,563 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1 \text{ MPa}$$

Malý tah v horních vláknech přeneše konstrukční výztuž při horním líci.

$$\sigma_v^d = \frac{N_v}{A} + \frac{M_v}{W_e} = -\frac{55,8}{37,5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}} - \frac{3,9}{1,563 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = -4,0 \text{ MPa}$$

Dolní vlákna jsou tlačena.

5.3 Výroba bednění a výztuže

Po návrhu jednotlivých vzorků se musela provést jejich realizace, která probíhala v laboratorních prostorách školy. Jako první bylo nutné zhotovit bednění. Celkem byly vyrobeny 2 bednicí formy, které byly z důvodu manipulace a maximálních rozměrů desek navrženy pro 4 vzorky. Jako materiál jsem zvolil vodovzdornou překližku tl. 18 mm. Jednotlivé desky byly zhotoveny externí firmou podle výkresu položek bednění. K sestavování bednění jsem použil kovové úhelníky, které jsem spojil s dřevěnou deskou pomocí samořezných šroubů. Do čelních stěn byly navíc dodatečně vytvořeny otvory pro protažení chrániček. Na závěr byla bednicí forma zpevněna pomocí 4 závitových tyčí.

Následovala výroba výztužných armokošů s chráničkami pro umístění předpínací výztuže. Kovová výztuž se nechala nařezat a naohýbat ve specializované firmě podle výkresu výztuže. Zbývalo tedy pouze vyvázat armokoše. Jako první se vyvázaly krajní kovové armokoše, které se skládaly



z 10 třmínků (rozdělené dle statického výpočtu) a dvou kovových profilů tvaru U (viz obr. 48). Stažení výztužných prvků dohromady bylo provedeno nejprve pomocí vázacího drátu, který byl později nahrazen stahovacími pásky z důvodu rychlejšího provádění. Celkem byly vytvořeny dva kovové armokoše do jednoho trámce, které byly propojeny pomocí přímé kompozitní skelné výztuže v horní a dolní části vždy dvěma pruty. Pro vybrané vzorky jsem navíc připevnil 40 mm dlouhé kousky ocelové výztuže ke kompozitní výztuži (viz obr. 49). Na vyrobené armokoše byly nasazeny distančníky pro zajištění krycí vrstvy 20 mm.



Obr. 49 Krajní kovový armokoš (foto: Tomáš Dejmek)



Obr. 50 Detail přidané kovové výztuže (foto: Martin Jonáš)

Do takto připravených armokošů zbývalo pouze umístit chráničky pro předpínací výztuž. Chráničky byly navíc opatřeny svislým vývodem pro umístění kabelů tenzometrů. Ocelové chráničky $\varnothing 50$ mm měly již tento vývod konstrukčně vyřešený z výroby. Do plastových chrániček $\varnothing 20$ mm byl uprostřed vyříznut otvor, ke kterému byla přilepena izolační páskou vývodní trubka stejného průměru a materiálu. Vývodní trubkou byl protažen vázací drát za účelem snadnějšího protažení budoucího kabelu tenzometru. Takto připravené chráničky umístěné do armokošů byly následně ukotveny v požadované výšce stanové dle statického výpočtu pomocí stahovacích



pásků. Okraje chrániček přesahovaly z bednicí formy. Přesahy byly následně před předpínáním výztuže odstraněny. Vzorky jsem dodatečně před betonáží opatřil montážními úchyty pro manipulaci. Úchyty byly vyrobeny ze zbytků kovové výztuže.



Obr. 51 Dokončené armokoše s chráničkami v bednění (foto: Martin Jonáš)

5.4 Betonáž vzorků

Následně po dokončení výroby armokošů a umístění chrániček do správné polohy bylo přistoupeno k betonování vzorků. Betonáž probíhala ve spolupráci s katedrou betonových konstrukcí a experimentálním centrem ve školní laboratoři. Návrh betonové směsi byl konzultován s odborným technologem betonu, aby bylo dosaženo požadované kvality.

Složení 1 m ³ betonové směsi	
Materiál	Hmotnost [kg]
Hrubé kamenivo frakce 8/16	700
Střední kamenivo frakce 4/8	190
Jemné kamenivo frakce 0/4	865
Cement 42,5 R - Mokrý	420
Voda	143
Plastifikátor Stachement 951	4
Mikroporan	0,6
Celkem	2 322,6

Tab. 9 Složení betonové směsi



Celkový objem potřebné betonové směsi pro vzorky dosahuje přibližně 0,7 m³, který dokáže největší míchací zařízení v laboratoři připravit ve 4 cyklech. Na začátku každého cyklu bylo potřeba odvážit jednotlivé složky betonové směsi dle receptury. Do míchacího zařízení se nejdříve přidalo kamenivo a voda. Poté se do směsi zamíchala voda, cement a přísady. Hotová betonová směs se vylila do plastové nádoby, ze které byla nabírána a ukládána do připraveného bednění. Směs byla rozprostřena a uhlazena pomocí zednické lžíce. Správné zhutnění betonové směsi bylo dosaženo jejím důkladným provibrováním. Po dokončení betonáže se povrch vzorků zvlhčil vodou.



Obr. 52 Vibrování betonové směsi (foto: Martin Jonáš)



Obr. 53 Dokončená betonáž vzorků (foto: Martin Jonáš)

Z betonové směsi byly navíc vyrobeny zkušební. Celkem bylo vyrobeno 5 zkušebních krychlí v průběhu betonáže. Rozměry zkušební krychle pro beton jsou 150x150x150 mm a slouží ke stanovení krychelné pevnosti betonu v tlaku.



5.5 Příprava vzorků před předpínáním

5.5.1 Odbednění a příprava předpínací výztuže

Odbednění vzorků se provedlo po týdnu zrání použité betonové směsi. Při vizuální prohlídce jednotlivých vzorků nebyly zjištěny žádné vady. Ze vzorků byly poté odstraněny přesahující konce chrániček.

Zbývalo pouze připravit předpínací výztuž, kterou bylo nutné opracovat dle navržených numerických modelů. Délka opracování byla namodelována 50 mm s plynulým přechodem ve dvou alternativách 1 mm a 2 mm. Celkem bylo potřeba opracovat 8 předpínacích lan, 4 vzorky v alternativě 1 mm a 4 vzorky v alternativě 2 mm. Poloha poškození byla umístěna pro všechny vzorky 1050 mm osově od hrany nosníku. K vybroušení předpínacích lan jsem použil úhlovou brusku.



Obr. 54 Opracovaná předpínací výztuž (foto: Tomáš Dejmek)

5.5.2 Návrh a rozmístění tenzometrů

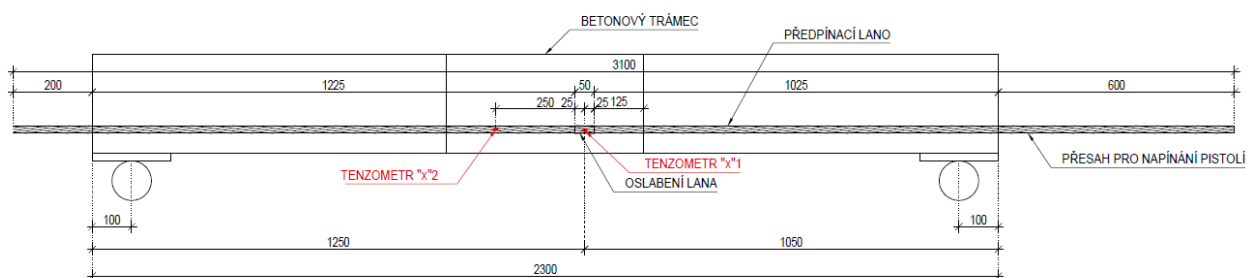
Před napínáním a zatěžováním bylo potřeba navrhnout umístění tenzometrů na předpínací lana. Na každé předpínací lano se připevnily 2 tenzometry HBM 3/120LY11. První tenzometr se umístil na střed mechanického opracování, tedy 25 mm od okraje. Druhý tenzometr se nalepil 250 mm od



mechanického opracování na nepoškozenou část. Oba tenzometry byly připevněny na jeden stejný drát předpínacího lana ve směru šroubovice. Tenzometry byly zapojeny do čtvrt-mostu. Označení tenzometrů se provedlo pomocí dvou symbolů. První symbol odkazuje na označení vzorku. Druhý symbol respektuje toto značení, 1 pro tenzometr v poškozené části a 2 pro tenzometr v nepoškozené části. Všechny tenzometry se navíc ochránily krycím nátěrem z transparentní pryskyřice. Celkem se umístilo pro 8 předpínacích lan 16 tenzometrů. Následně byla předpínací výztuž s nalepenými tenzometry umístěna do betonových vzorků a bylo provedeno první měření magnetické odezvy na předepnutých vzorcích.

Označení tenzometrů pomocí symbolů		
Vzorek	Tenzometr-poškozená část	Tenzometr-nepoškozená část
A	A1	A2
B	B1	B2
C	C1	C2
D	D1	D2
E	E1	E2
F	F1	F2
G	G1	G2
H	H1	H2

Tab. 10 Označení tenzometrů



Obr. 55 Schéma umístění předpínacích lan ve vzorcích



Obr. 56 Tenzometr B1 (foto: Tomáš Dejmek)



5.6 Dodatečné předepnutí vzorků

Připravené betonové trávce zbývalo pouze předepnout. Pro předpínání vzorků byla objednána specializovaná firma na předpínání konstrukcí.

Před zahájením předpínání byla provedena orientační zkouška pevnosti betonu na vyrobených krychlích. Betonová směs dosahovala lepších hodnot, než bylo uvažováno ve výpočtu. Průměrná hodnota krychelné pevnosti v tlaku betonu dosahovala hodnoty 59,2 MPa.

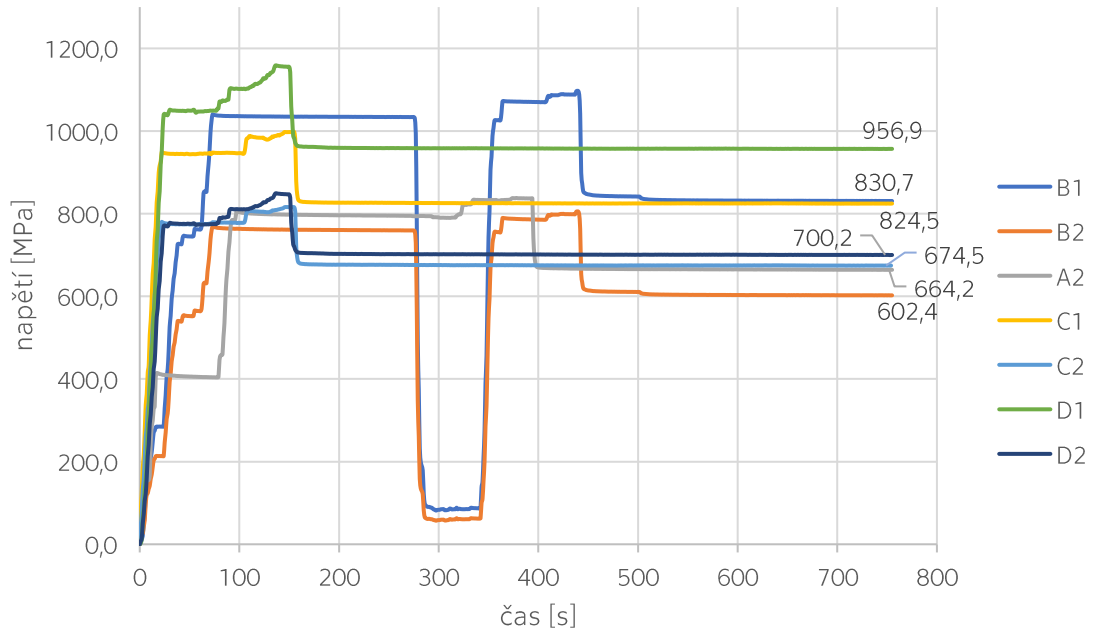
Číslo vzorku	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Stáří Vzorku [dny]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	149,2	148,4	149,2	20	1406,78	63,5
2	149,3	149,2	149,3	22	1308,61	58,7
3	149,3	148,0	149,4	22	1154,87	52,3
4	149,3	147,6	149,3	22	1347,32	61,1
5	150,1	151,0	150,0	22	1370,29	60,4

Obr. 57 Výsledky tlakové zkoušky betonu

Před zahájením předpínání se na jednotlivé konce předpínacích lan umístily kotevní desky a kotevní zařízení. Předpínání jednotlivých vzorků bylo provedeno pomocí hydraulické předpínací pistole. Napínání bylo současně sledováno pomocí tenzometrů. Požadované předpětí bylo stanoveno na hodnotu 600 MPa. Pro vzorky s poškozením 2 mm byl tento návrh upraven na hodnotu 500 MPa z důvodu velkých napětí v poškozené oblasti. Poklesy napětí jsou způsobeny pokluzem při zakotvení lana. Tenzometry H1 a A1 byly poškozeny během napínání. U vzorků s ocelovou chráničkou byla následně provedena injektáž cementovou maltou. Po vytvrdnutí injektážní malty byla měřena magnetická odezva předepnutých vzorků.

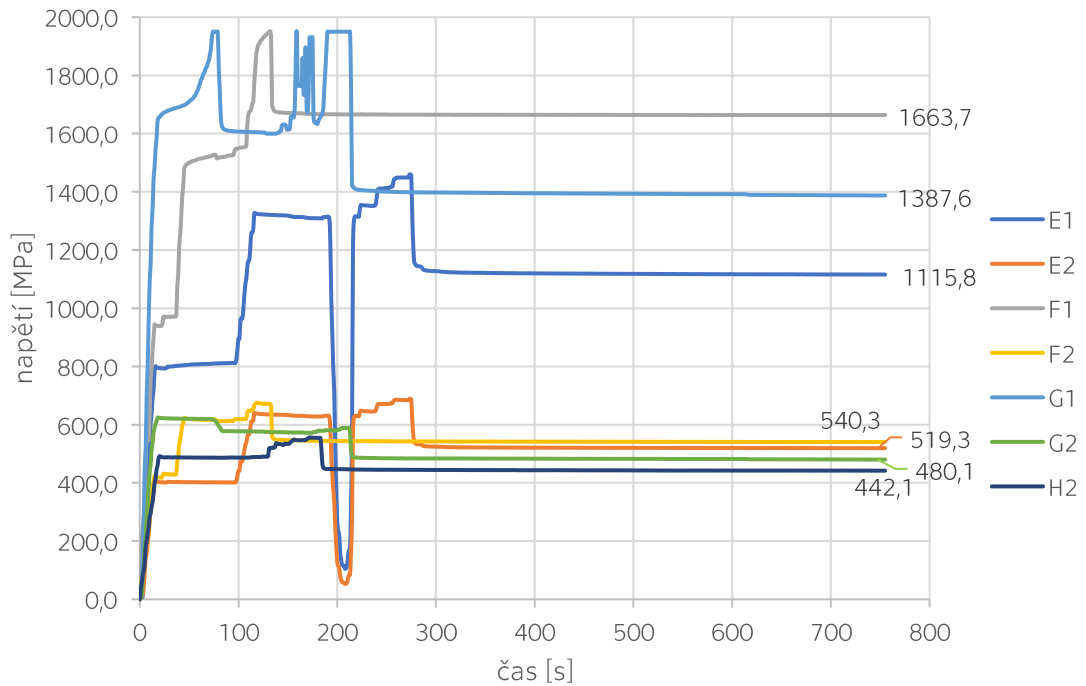


Předepnutí vzorků s poškozením 1 mm



Obr. 58 Předepnutí vzorků s poškozením 1 mm

Předepnutí vzorků s poškozením 2 mm



Obr. 59 Předepnutí vzorků s poškozením 2 mm



Z výsledků tenzometrického měření bylo možné provést korelaci s numerickými modely.

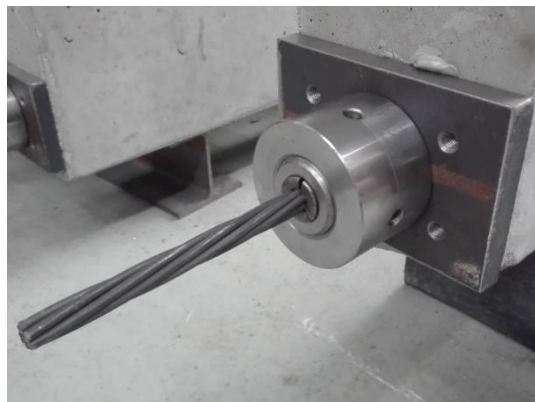
Oslabení	Numerický model	B1/B2	C1/C2	D1/D2
1 mm	1,22	1,38	1,22	1,37
Oslabení	Numerický model	E1/E2	F1/F2	G1/G2
2 mm	1,77	2,15	3,08	2,89

Tab. 11 Srovnání numerických modelů s naměřenými hodnotami

Velké rozdíly mezi naměřenými hodnotami a výsledky z numerického modelu se projevily převážně u oslabení 2 mm. Tento rozdíl může být způsoben nepřesným opracováním předpínacích lan, který se mnohem více projeví u většího oslabení.



Obr. 60 Injektáž vybraných vzorků
(foto: Tomáš Dejmek)

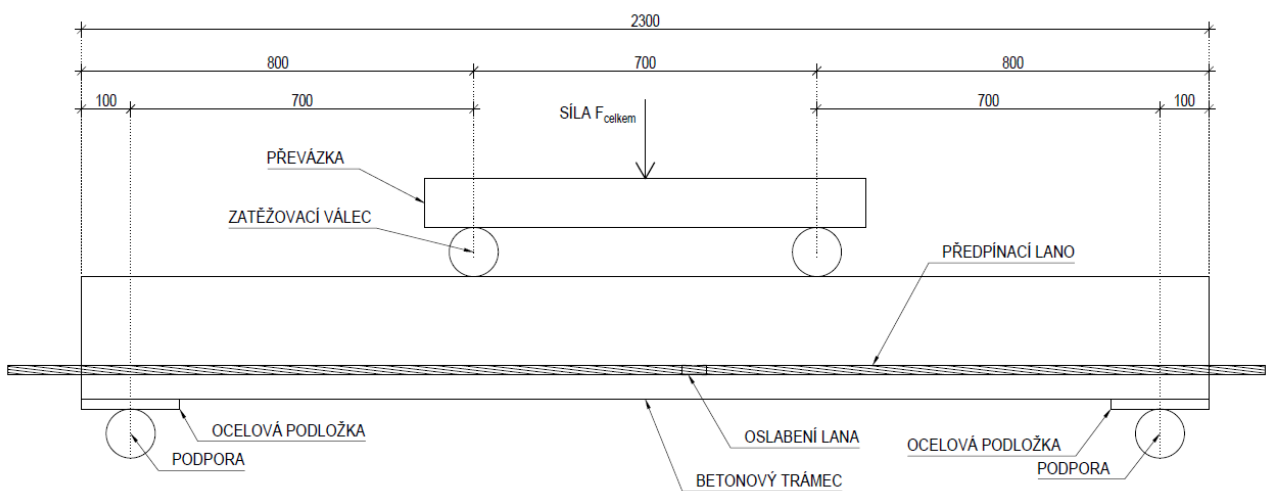


Obr. 61 Detail zakotveného lana
(foto: Tomáš Dejmek)



5.7 Čtyřbodová zatěžovací zkouška

Pro betonové trávce bylo navrženo zatěžování pomocí čtyřbodového ohybu k dosažení různých úrovní napjatosti v předpínacím laně. Vzdálenost zatěžovacích sil byla 600 mm. Zatěžování bylo provedeno v postupných přírůstcích zatížení až do porušení. Velikost přírůstku byla individuálně stanovena pro každý vzorek před zahájením zkoušky. Celkem byly požadovány minimálně 3 měření magnetické odezvy. Z důvodu bezpečnosti byl během zatěžovací zkoušky umístěn snímač dráhy pro sledování vývoje deformací.



Obr. 62 Schéma čtyřbodového ohybu



Obr. 63 Porušený vzorek A (foto: Tomáš Dejmek)



6 Měření pomocí metody MMM

Diagnostika metodou MMM byla prováděna pomocí speciálního měřicího zařízení, které se skládá z přijímacího zařízení typ TSC-7M-16 a pojízdného skenovacího zařízení. Skenovací zařízení má různé konstrukční varianty. Pro měření v experimentu byla použita zařízení typ 1 (vozíček) a typ 2. Skenovací zařízení typ 2 nám bylo zapůjčeno v průběhu experimentu z firmy PREDISTEST. Skenovací zařízení má na sobě umístěny měřící jednotky, které měří v rovnoběžném směru s povrchem a ve směru kolmém na povrch. Typ 1 má 4 skenovací sondy. Typ 2 má pouze 2 skenovací sondy, ale poskytuje vyšší citlivost.



Obr. 64 Přijímací zařízení TSC-7M-16
(foto: Tomáš Dejmek)



Obr. 66 Skenovací zařízení typ 1 - vozíček
(foto: Tomáš Dejmek)



Obr. 65 Skenovací zařízení typ 2
(foto: Tomáš Dejmek)



SCHÉMA SKENOVACÍHO ZAŘÍZENÍ TYP 1

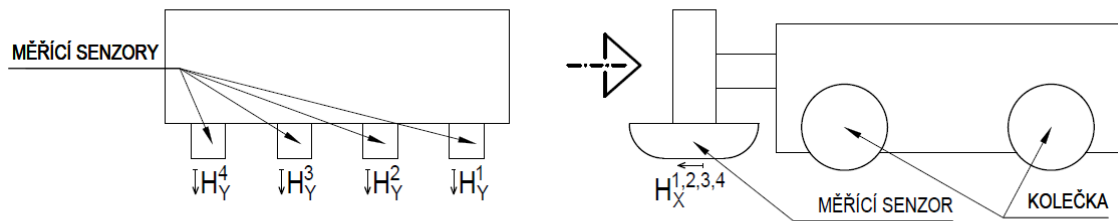
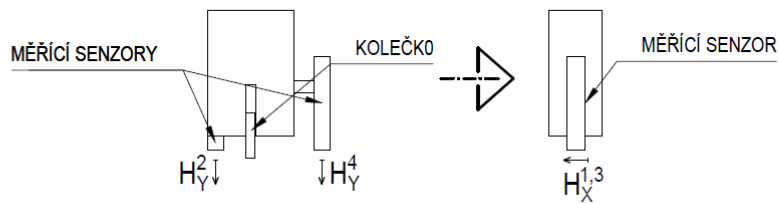


SCHÉMA SKENOVACÍHO ZAŘÍZENÍ TYP 2



Obr. 67 Schéma skenovacích zařízení

Měření je prováděno pojížděním po povrchu vyšetřovaného objektu. Aktuální měřené hodnoty jsou zobrazovány na monitoru přijímacího zařízení. Naměřené hodnoty lze uložit do paměti a následně nainportovat do počítače.

Zařízení zaznamenává tři veličiny:

- H - intenzitu magnetického pole [A/m]
- dH/dx - gradient magnetického pole [(A/m)/mm]
- L_x - měření skenované vzdálenosti [mm]

Hodnoty se následně zobrazí v přehledném grafu, kde je možné vyčíst všechny naměřené veličiny. V grafu u změny magnetického pole jsou vyznačeny 2 vodorovné úsečky. Slabá modrá udává průměrnou hodnotu změny magnetického pole. Zatímco čárkovaná červená představuje hodnotu čtyřnásobku průměrné hodnoty. Hodnoty pod touto úrovní můžeme označit pouze jako šum při měření. Ostatní hodnoty překračující tuto mez lze považovat za potenciální místa SCZ.



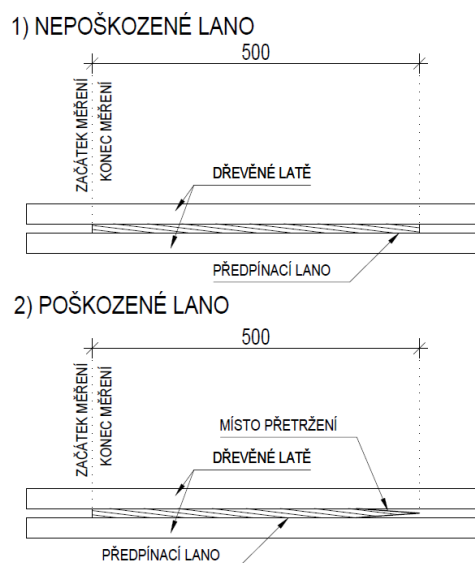
6.1 Měření na samostatném předpínacím laně

První měření bylo provedeno na samostatném předpínacím laně, které posloužilo jako výchozí měření. Jako vzorek bylo vybráno stejné předpínací lano použité pro betonové předpjaté trámce. K možnému porovnání byla měřena magnetická odezva i na přetrženém zkorodovaném předpínacím laně z reálného mostního objektu.



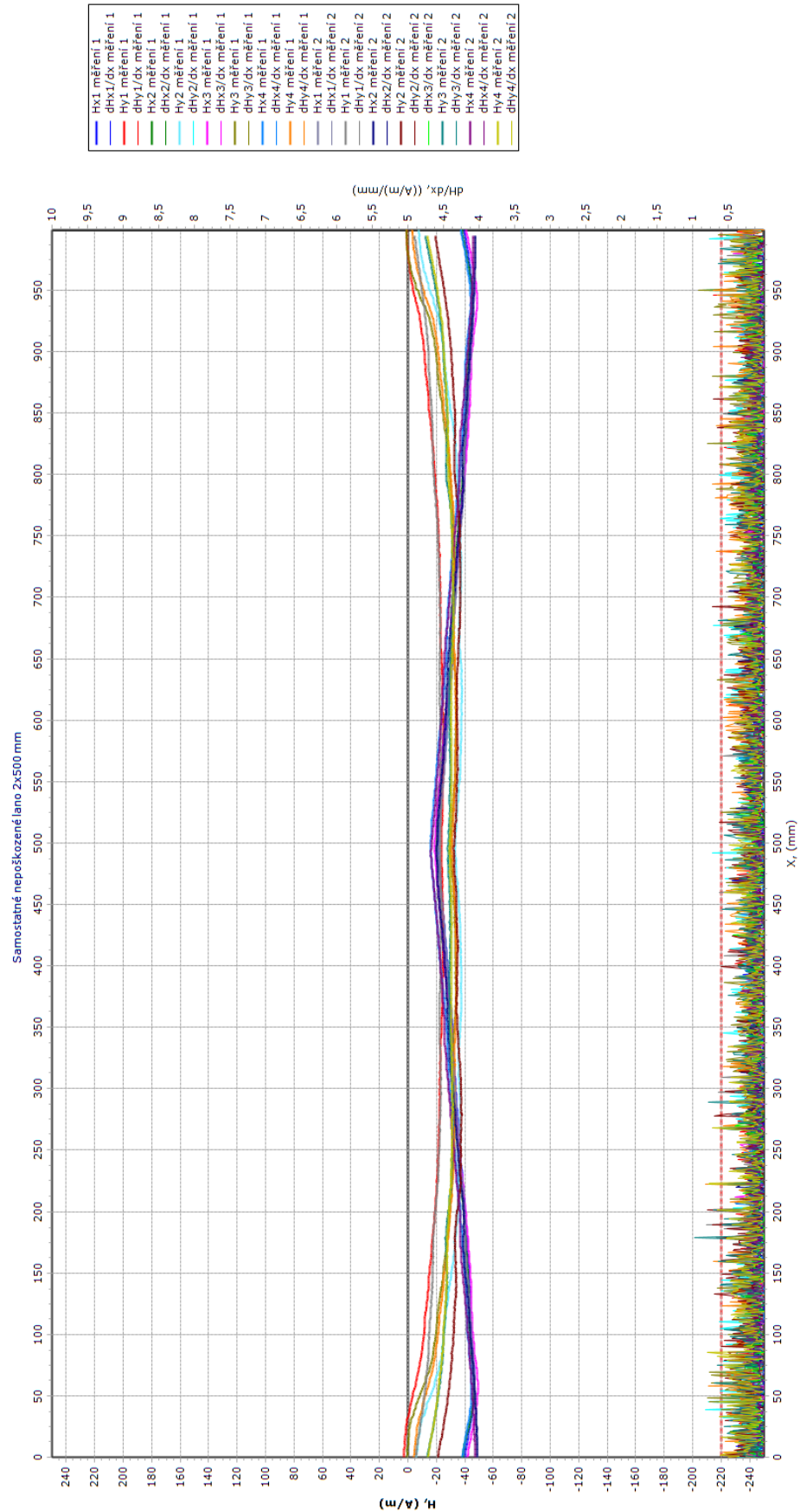
Obr. 68 Poškozené předpínací lano (foto: Tomáš Dejmek)

Předpínací lana se umístila mezi dřevěné latě, na kterých byla vyznačená měřicí ryska 0 až 500 mm. Skenování magnetické odezvy bylo provedeno na konec úseku a zpět. Délka skenovaného úseku byla 2x500 mm. U poškozeného předpínacího lana se přetržení umístilo na konec úseku měření. Měření bylo provedeno celkem 2x.

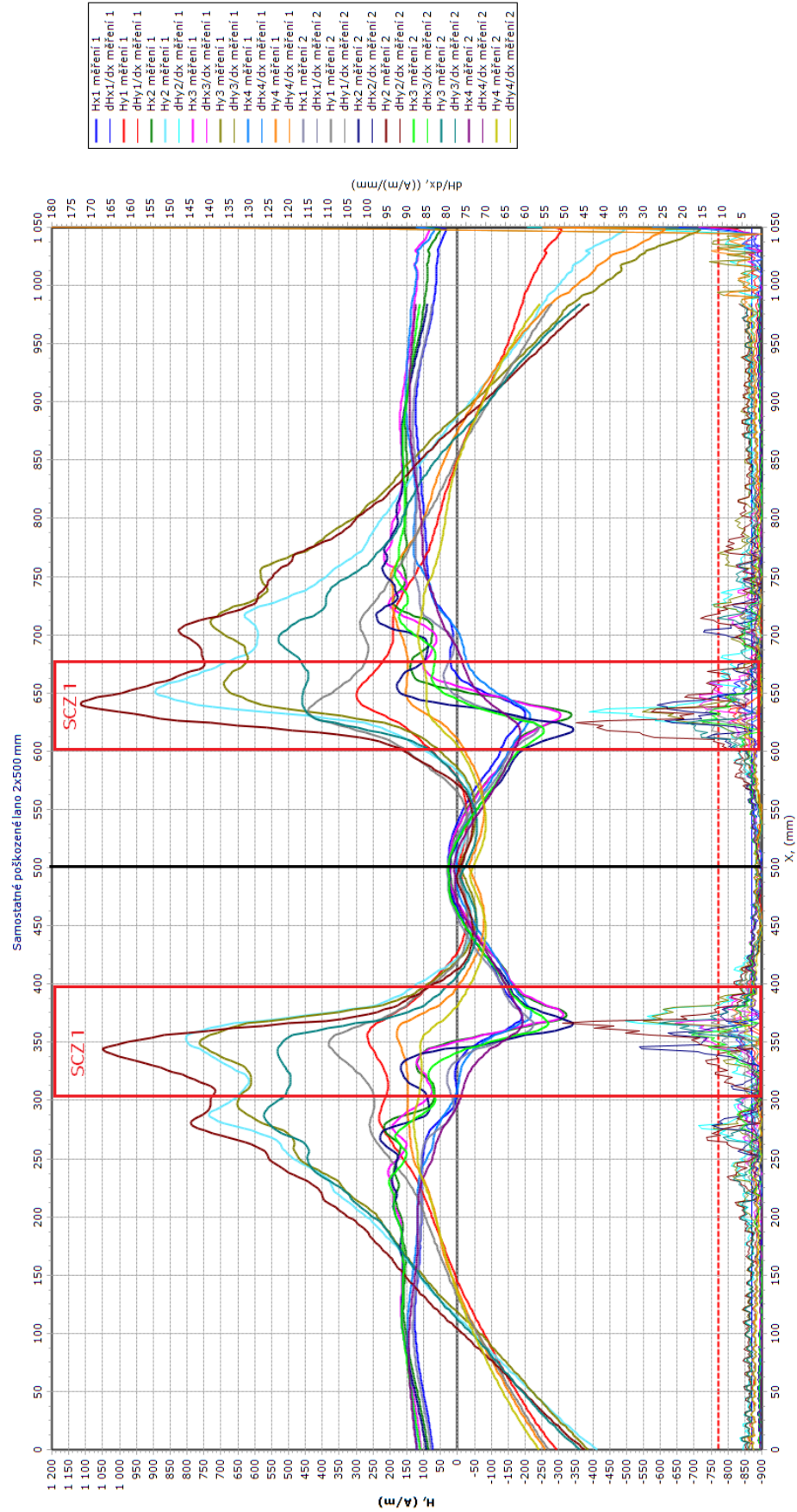


Obr. 69 Schéma měření samostatní předpínací výztuž

Z výsledného měření na obou předpínacích lanech lze pozorovat značné rozdíly. Nepoškozené předpínací lano vykazuje pouze slabou magnetickou odezvu a po celé délce nedochází ke změně intenzity magnetického pole. Zatím co u poškozeného předpínacího lana tyto hodnoty rostou řádově v místě korozního poškození. Základní měření ukázalo, že i u předpínací výztuže lze lokalizovat SCZ.



Obr. 70 Výsledky měření-samostatné předpínací lano



Obr. 71 Výsledky měření-poškozené předpínací lano



6.2 Měření na předpjatých betonových vzorcích

Hlavním cílem celé práce bylo měření magnetické odezvy na betonových předpjatých vzorcích. Měření bylo provedeno postupně na:

- nepředepnutých vzorcích
- předepnutých vzorcích
- vzorcích zatížených pomocí čtyřbodové ohybové zkoušky

Na vybetonovaných vzorcích se vyznačil úsek, kde bylo provedeno měření. Pro měření byla vyhrazena délka 500 mm nacházející se 900 mm od obou konců. Poloha oslabení předpínacího lana začínala 125 mm od začátku měření. Lokální oslabení bylo 50 mm dlouhé. Vzorky byly skenovány na boční straně s krytím betonu 70 mm a na dolní straně s krytím betonu 50 mm. Pro přesnější měření byla vyznačena osa předpínacího lana na povrch betonového vzorku. Na boční straně se osa měření nacházela 60 mm od dolní hrany. Na dolní straně odpovídala polovině šířky vzorku (75 mm od hrany). Vzorky byly měřeny vždy 2x. Ke skenování byla využita nejdříve sonda typu 1, která byla doplněna po předepnutí skenovací sondou typu 2. Sonda typ 1 měřila všemi měřícími sondami a osa přístroje odpovídala ose měření. Sonda typ 2 měřila vzorky pouze jednou měřící sondou přímo po ose měření.

SCHÉMA MĚŘENÍ S KRYCÍ VRSTVOU 70 MM

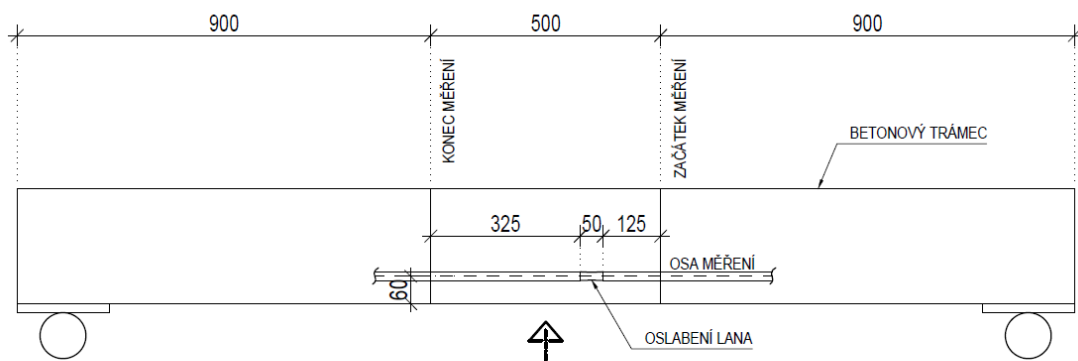
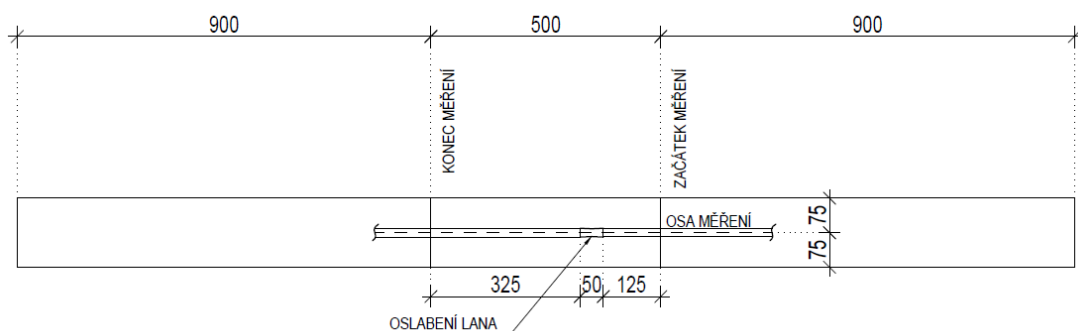


SCHÉMA MĚŘENÍ S KRYCÍ VRSTVOU 50 MM



Obr. 72 Schéma měření předpjaté vzorky



Výsledky celého měření byly zpracovány a vyhodnoceny. Při vyhodnocování naměřených výsledků byla obě měření spojena do jednoho grafu s označením v legendě měření 1 a měření 2. Pro jednotlivé vzorky jsou zde uvedeny výsledky měření s tloušťkou krycí vrstvy 50 mm měřená sondou typ 1 v úrovni nepředepnuté lana, předepnuté lana a poslední přírůstek zkoušky. V některých případech je toto měření doplněno výsledky ze sondy typ 2. U vzorku A je uvedeno i měření s tloušťkou krycí vrstvy 70 mm pro srovnání. Vzhledem k velkému množství měření a výsledným hodnotám nebylo nutné uvádět všechny naměřené výsledky.

U každého vzorku je uvedena tabulka průběhu měření. V tabulce jsou uvedeny hodnoty napětí u oslabeného a neoslabeného průřezu. Chybějící hodnoty jsou způsobeny poškozením tenzometru. V grafu je vyznačena oblast mechanického oslabení průřezu černým obdélníkem. Pro zóny koncentrace napětí (SCZ) je zvolena červená barva. Při vyhodnocování dat se v grafu objevují místa s výraznější změnou intenzity magnetického pole, která se různě mění a mohla být způsobena ostatními vlivy (přidaná kovová výztuž, oddálení sondy, nerovnost povrchu). Jejich hodnota je podstatně nižší než u poškozeného samostatného lana. Tyto místa jsou označeny fialovou barvou.



6.2.1 Vzorek A

- oslabení 1 mm
- kovová chránička
- kovová výztuž

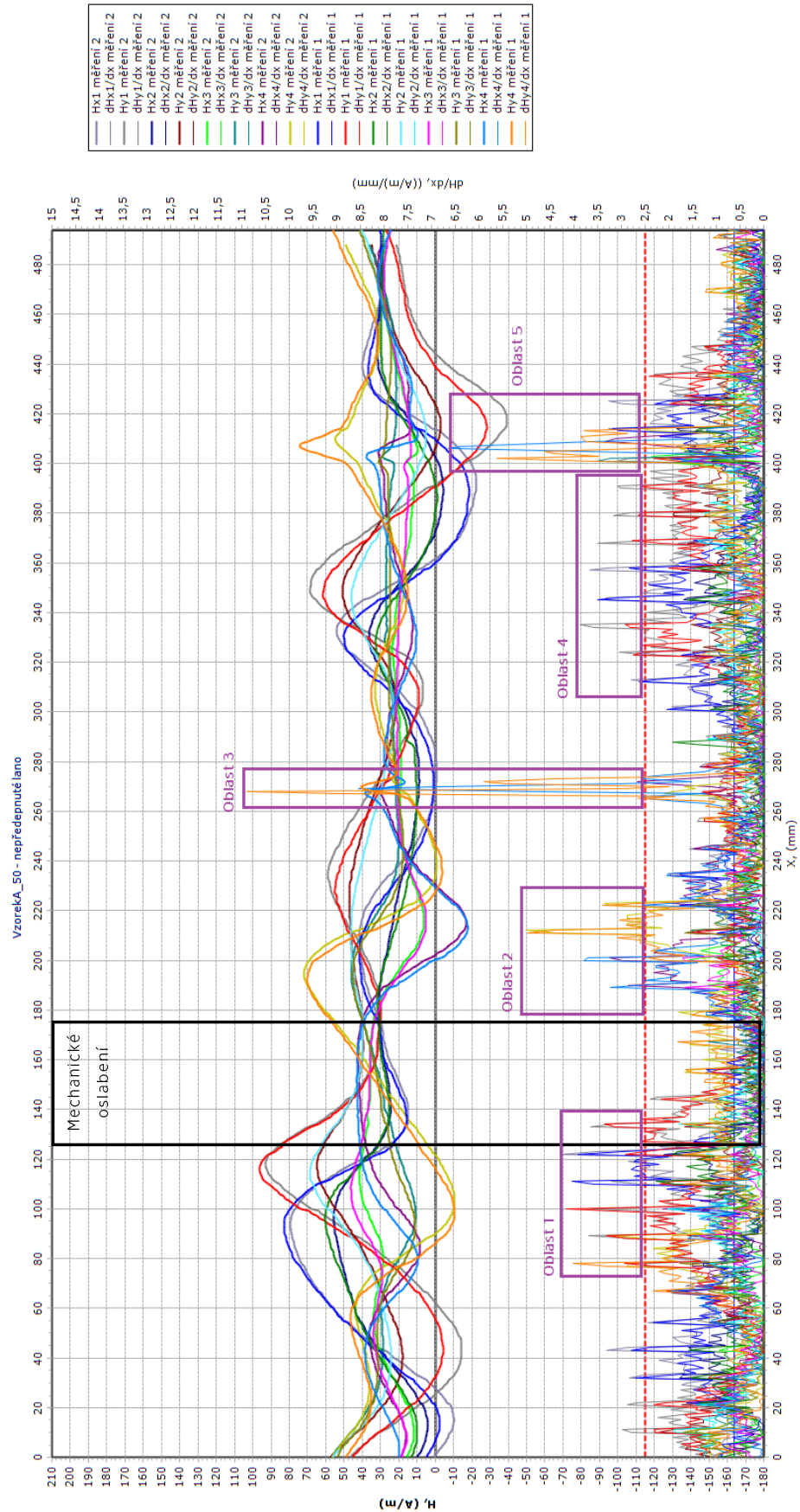
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	-	638
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	45	-	694
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	90	-	1207
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	120	-	1448
5. měření magnetické odezvy			
zkouška - 4.přírůstek	140	-	1620

Tab. 12 Postup měření vzorek A

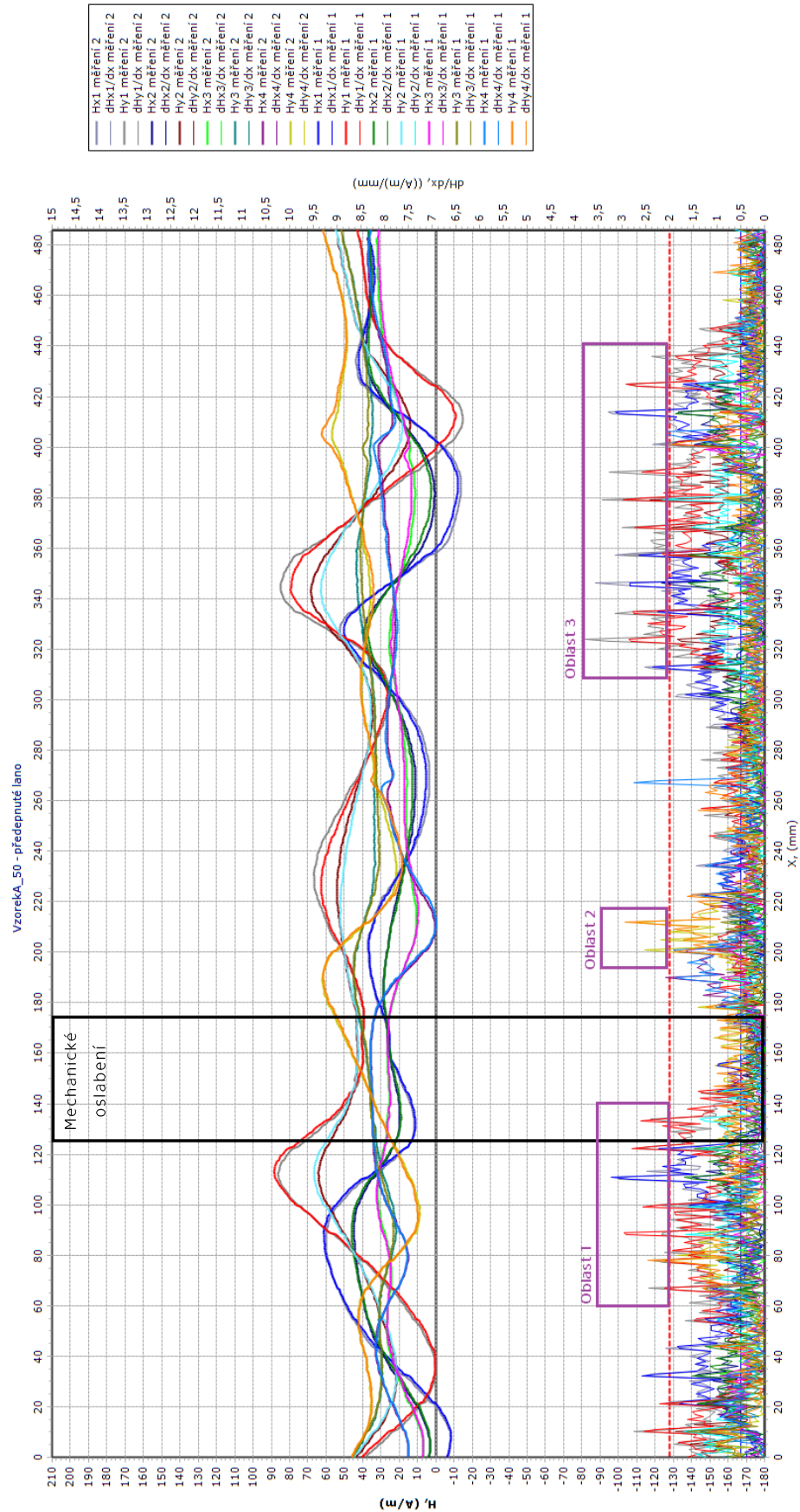
Pro vzorek A jsou zde uvedeny výsledky měření s tloušťkou krycí vrstvy 50 mm a 70 mm pro porovnání.

U nepředepnutého vzorku s tloušťkou krycí vrstvy 50 mm má graf intenzity magnetického pole nepravidelný sinusový tvar. V grafu se objevují oblasti se změnou intenzity magnetického pole. Jsou měřeny převážně krajními sondami a mohou být způsobeny přidanou kovou výztuží. U předepnutého lana se průběh intenzity magnetické pole příliš nezměnil a vyskytují se zde také oblasti se změnou intenzity magnetické pole. Pro porovnání je zde uvedeno měření sondou typ 2, která tyto oblasti vůbec nedetekuje. K výrazné změně dochází při zatěžovací zkoušce. U změny intenzity magnetického pole nejsou registrovány žádné významné špičky vztahující se k místu oslabení.

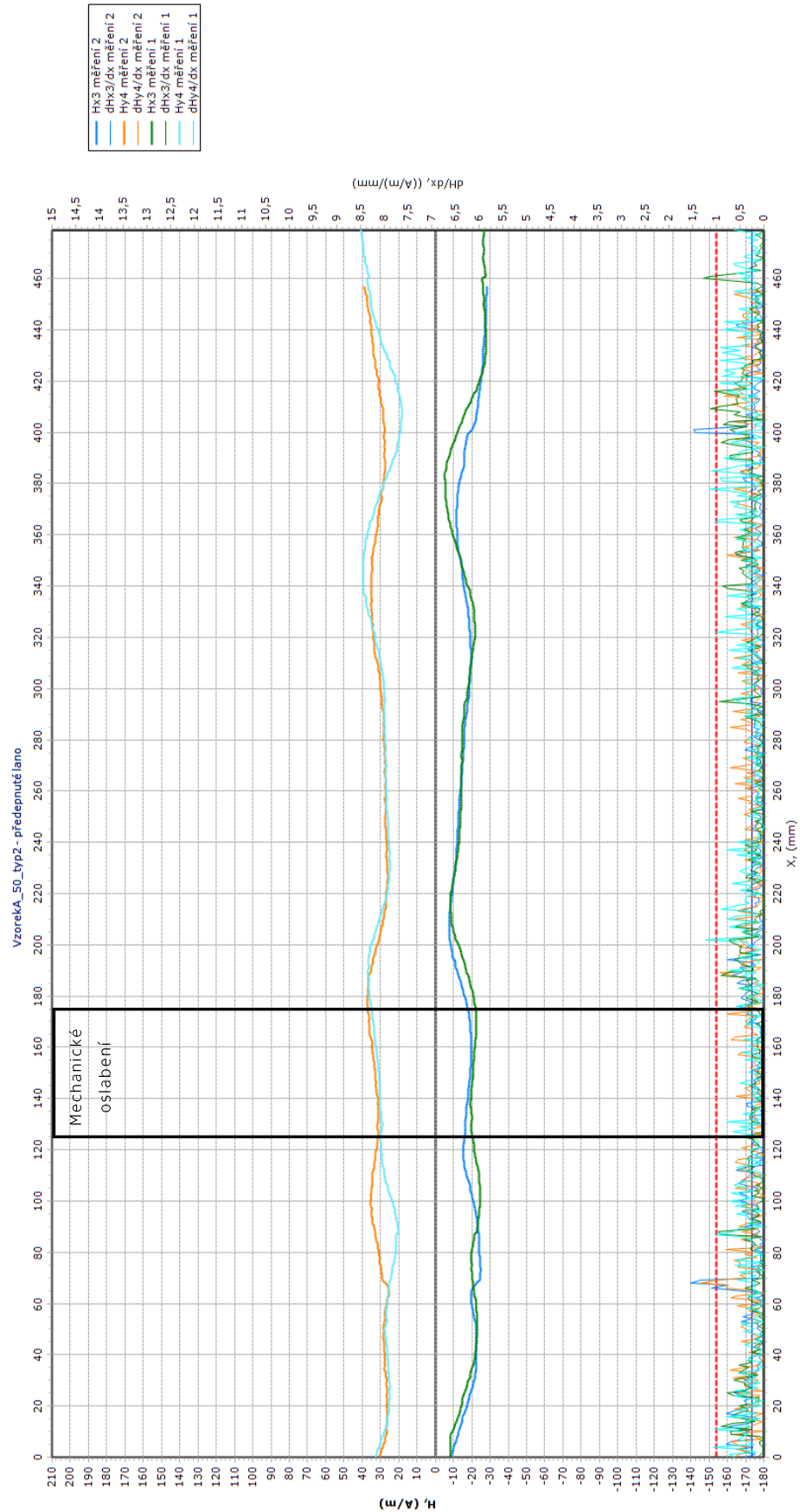
U měření s tloušťkou krycí vrstvy 70 mm jsou průběhy intenzity magnetického pole po celou dobu konstantního průběhu. Ve směru y dochází v průběhu k postupnému zvyšování hodnot. Pro vyšší tloušťku krycí vrstvy 70 mm nebyla zaznamenána výrazná podobnost s výsledky krycí vrstvy 50 mm. Pro tloušťku krycí vrstvy 70 mm nebyly detekovány SCZ v místě oslabení.



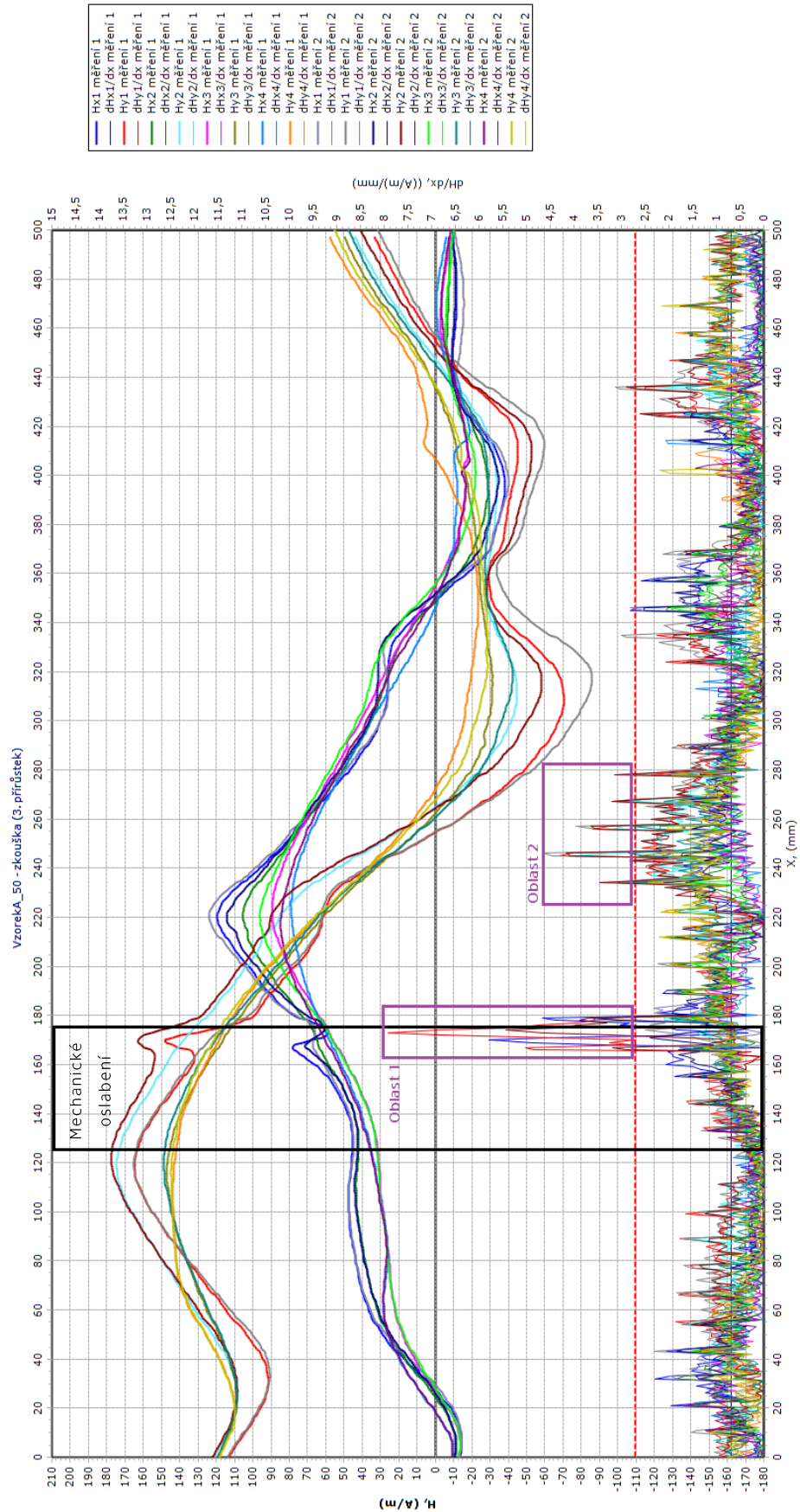
Obr. 73 Výsledky měření-vzorek A



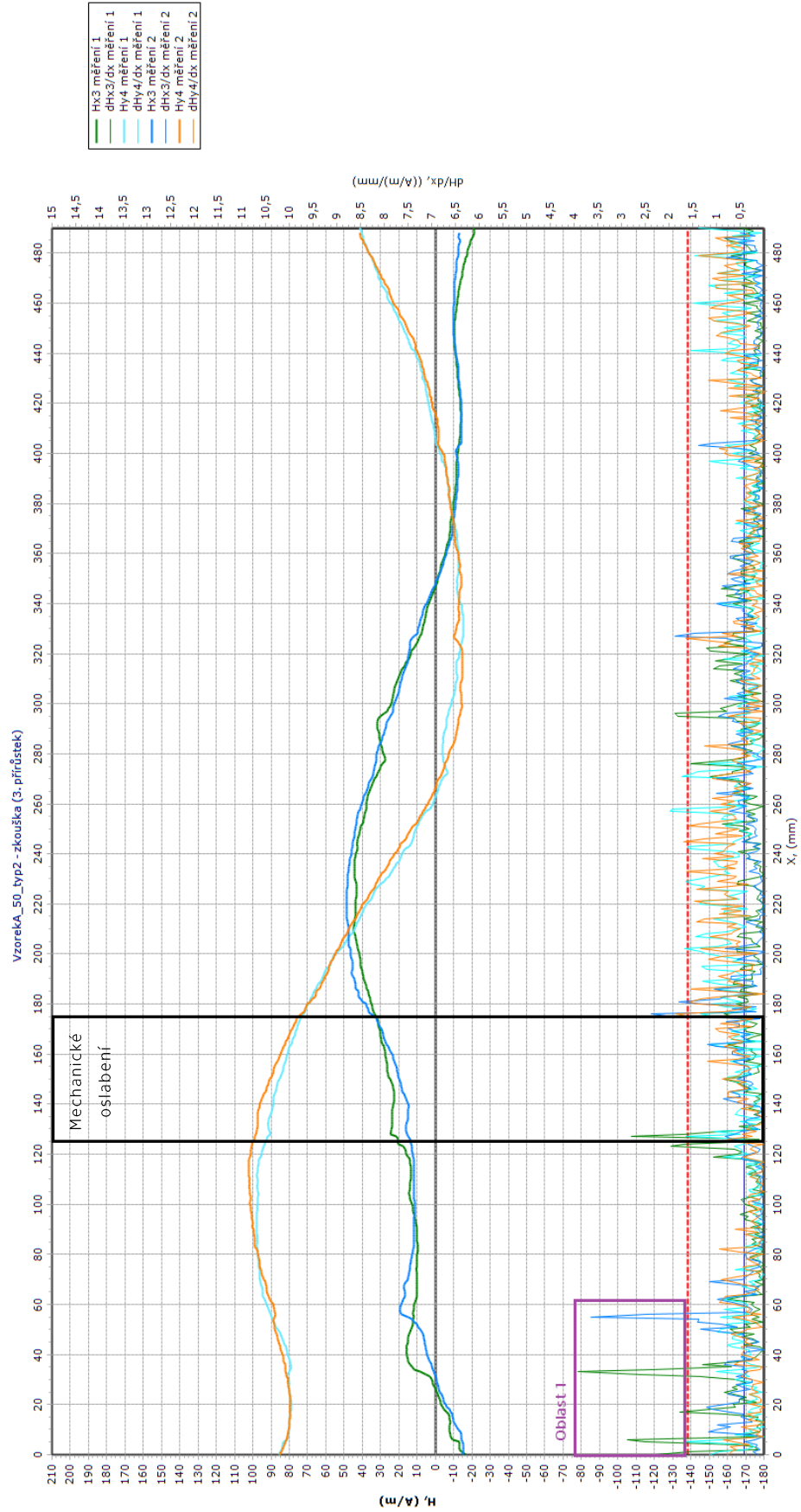
Obr. 74 Výsledky měření-vzorek A



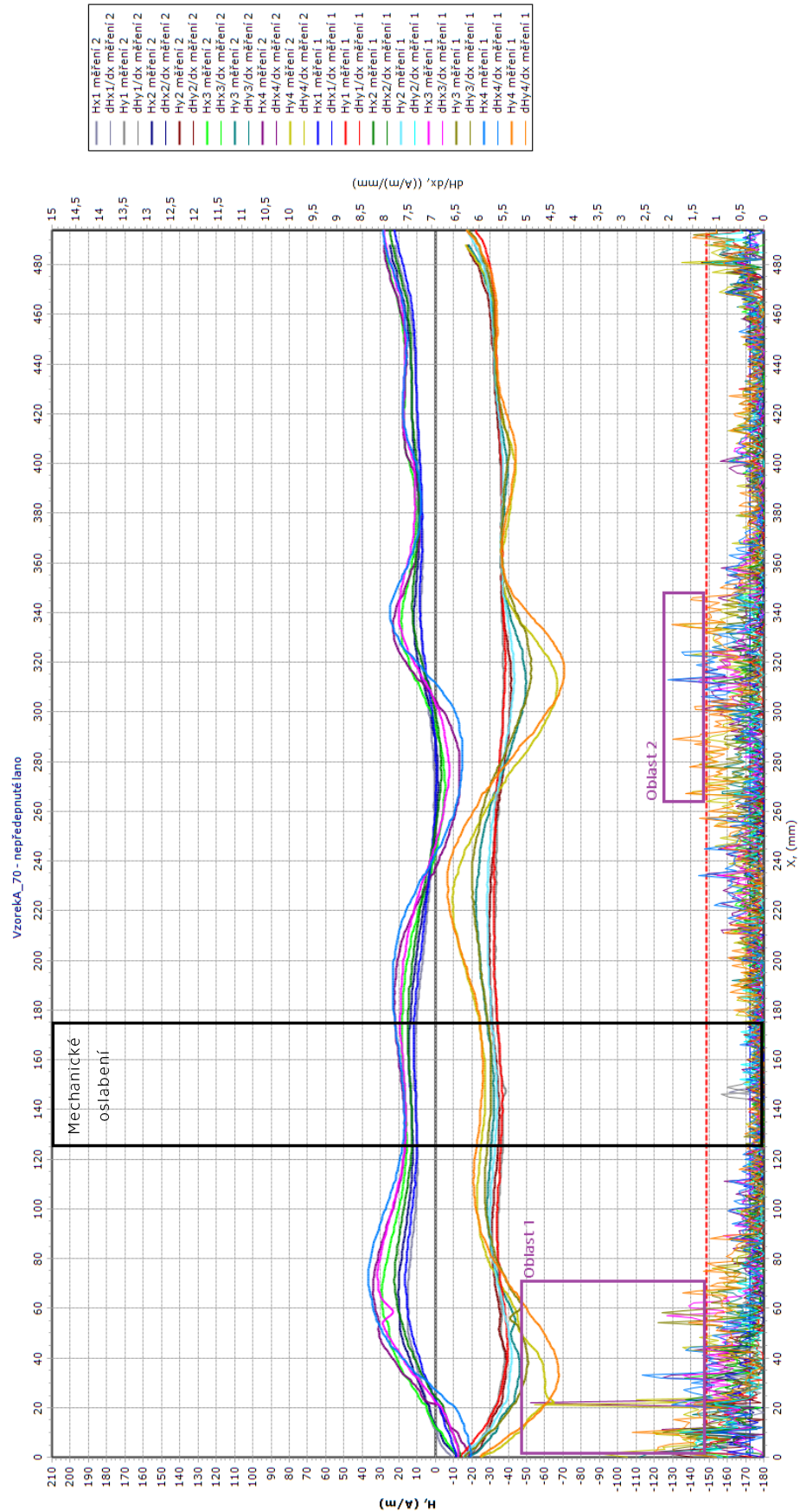
Obr. 75 Výsledky měření-vzorek A



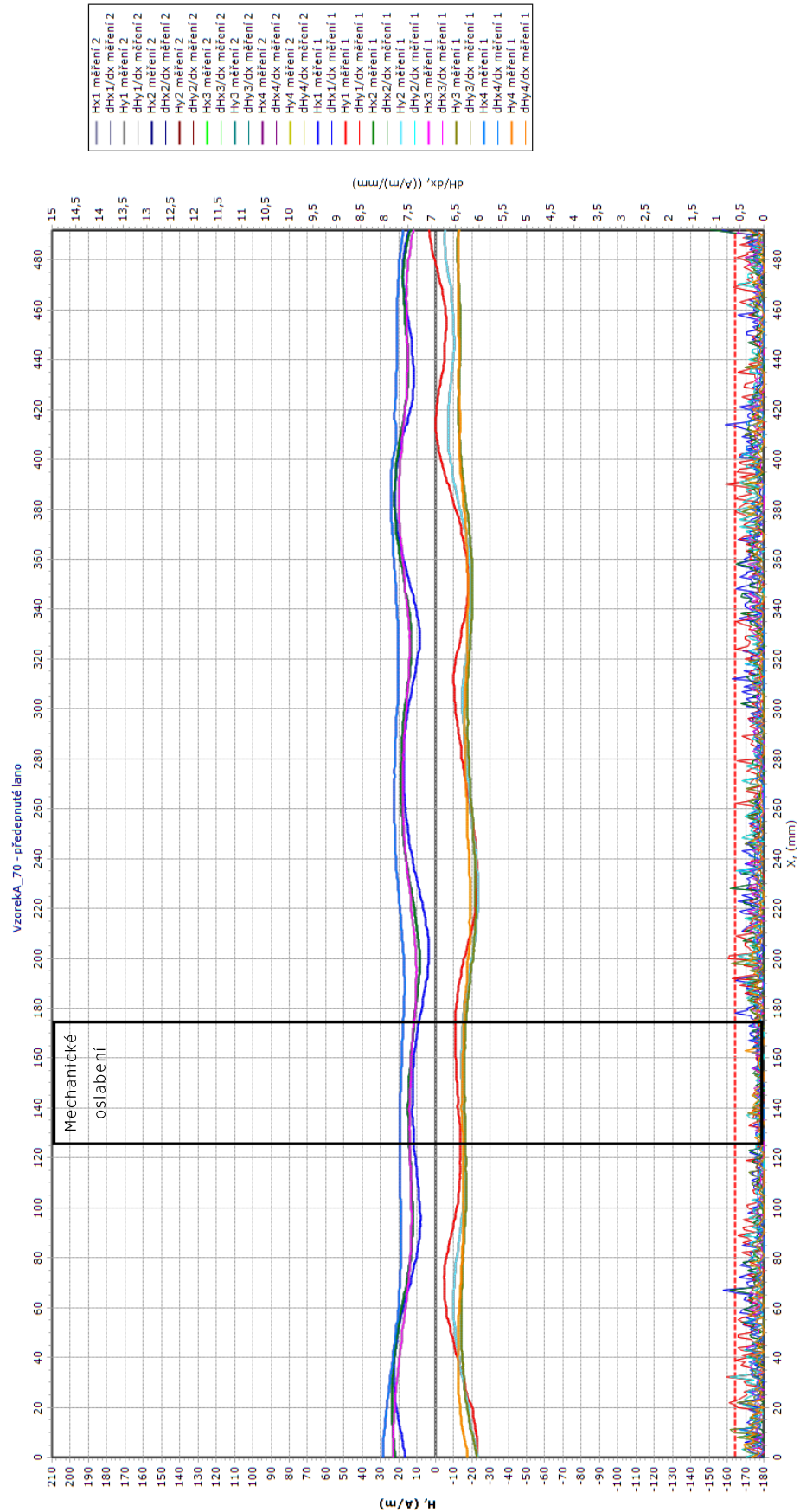
Obr. 76 Výsledky měření-vzorek A



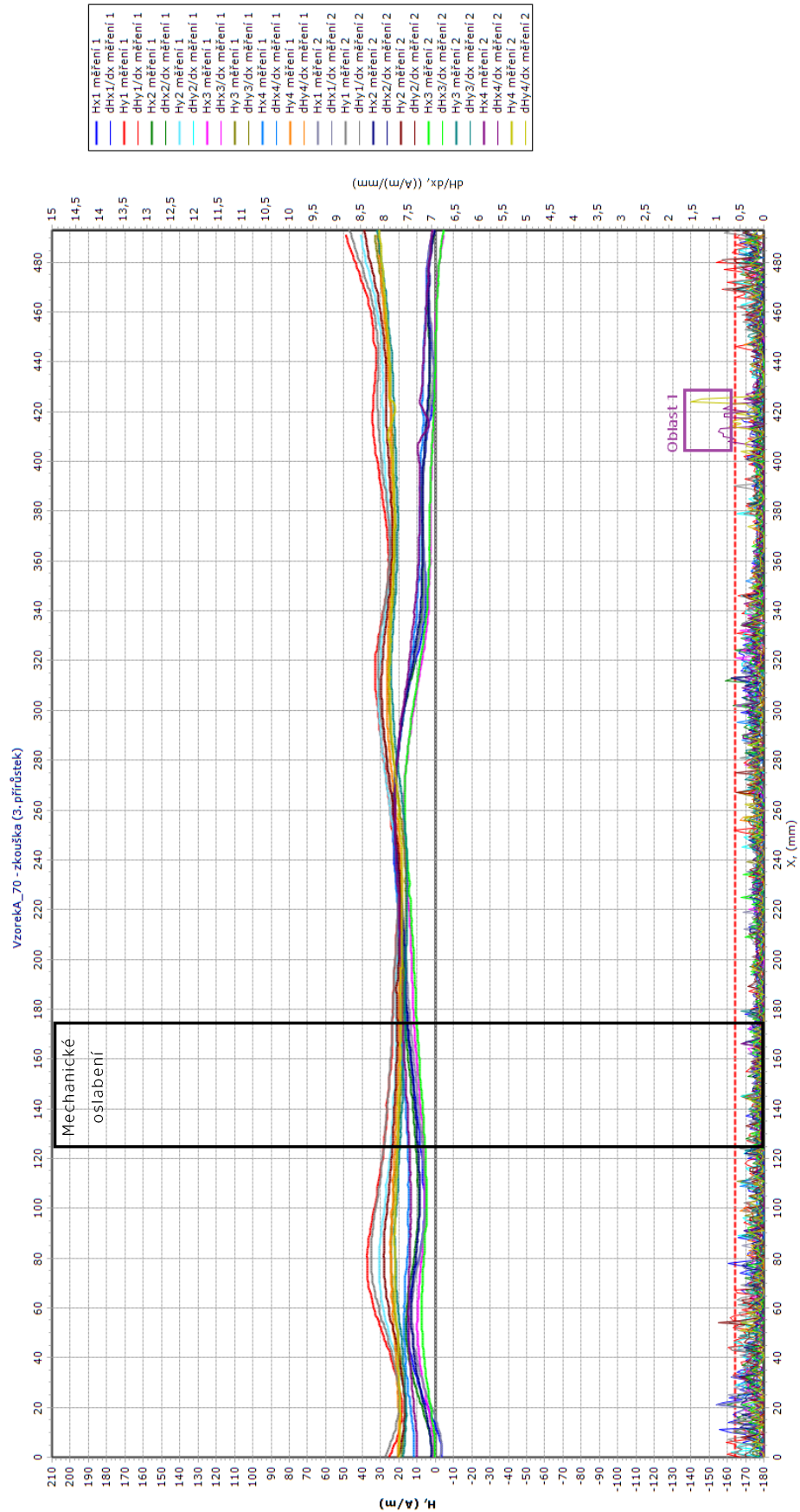
Obr. 77 Výsledky měření-vzorek A



Obr. 78 Výsledky měření-vzorek A



Obr. 79 Výsledky měření-vzorek A



Obr. 80 Výsledky měření-vzorek A



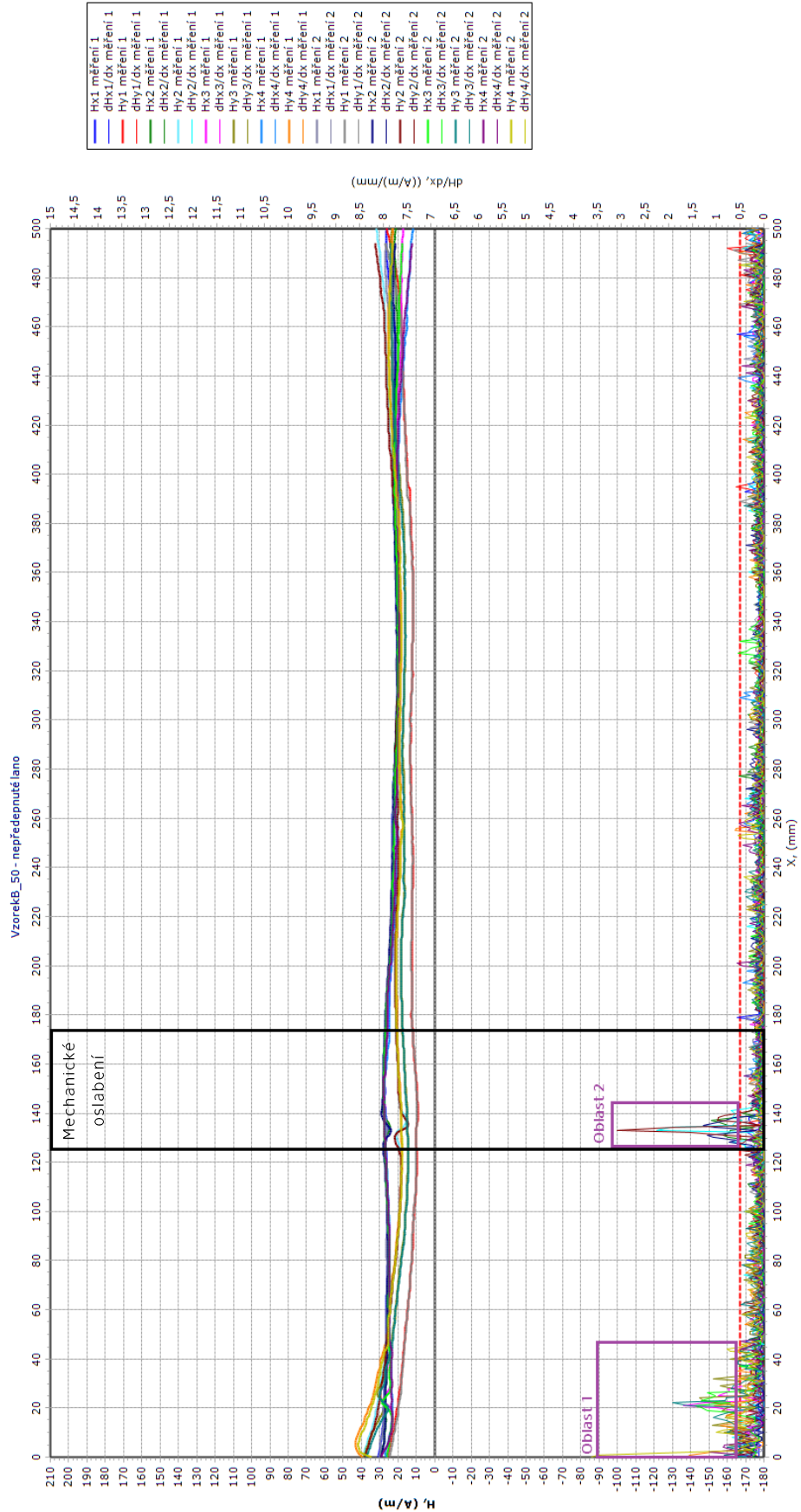
6.2.2 Vzorek B

- oslabení 1 mm
- kovová chránička
- bez kovové výztuže

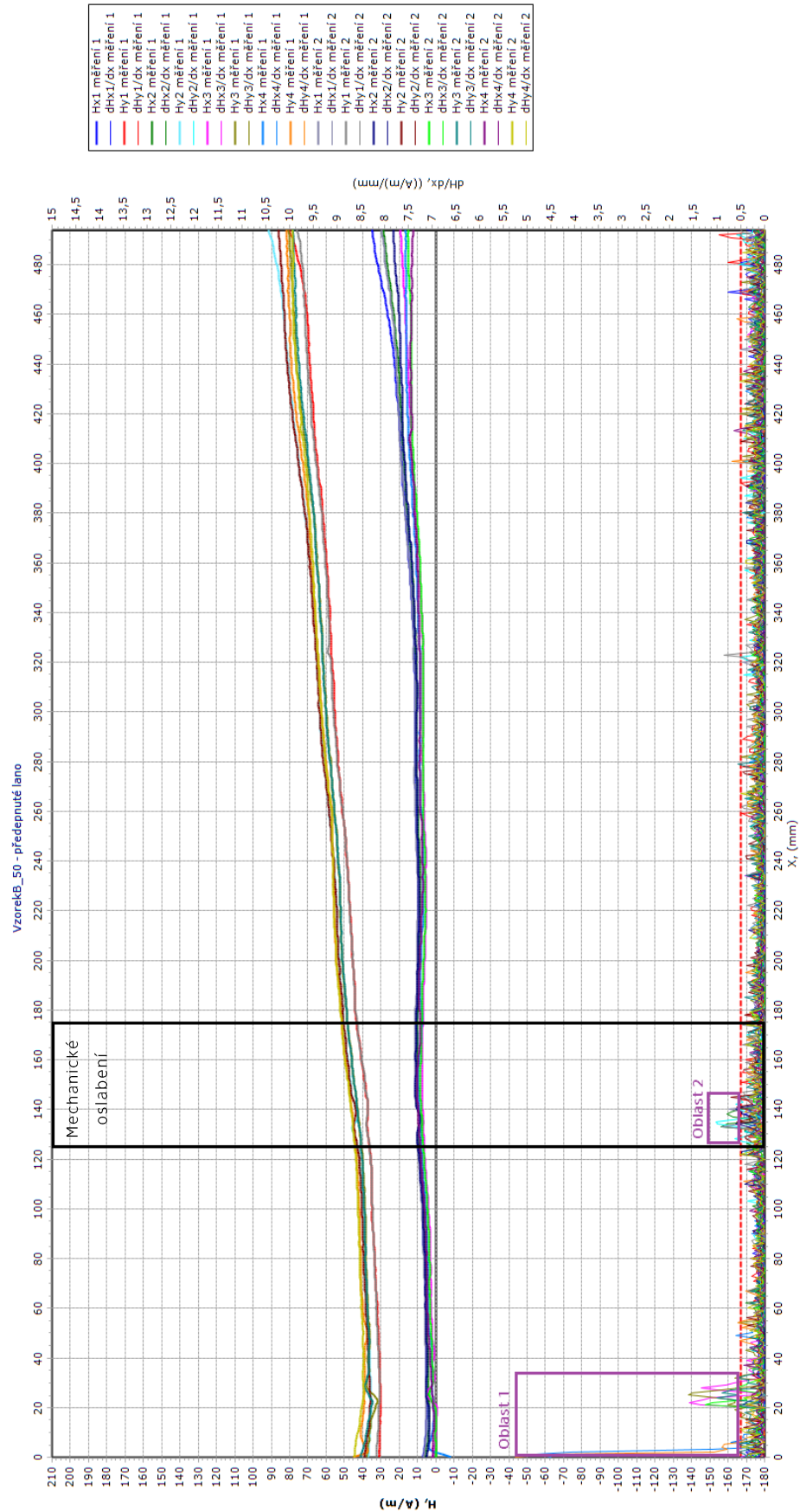
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	804	581
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	45	884	657
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	90	1754	1153
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 4.přírůstek	135	-	1620
5. měření magnetické odezvy			

Tab. 13 Postup měření vzorek B

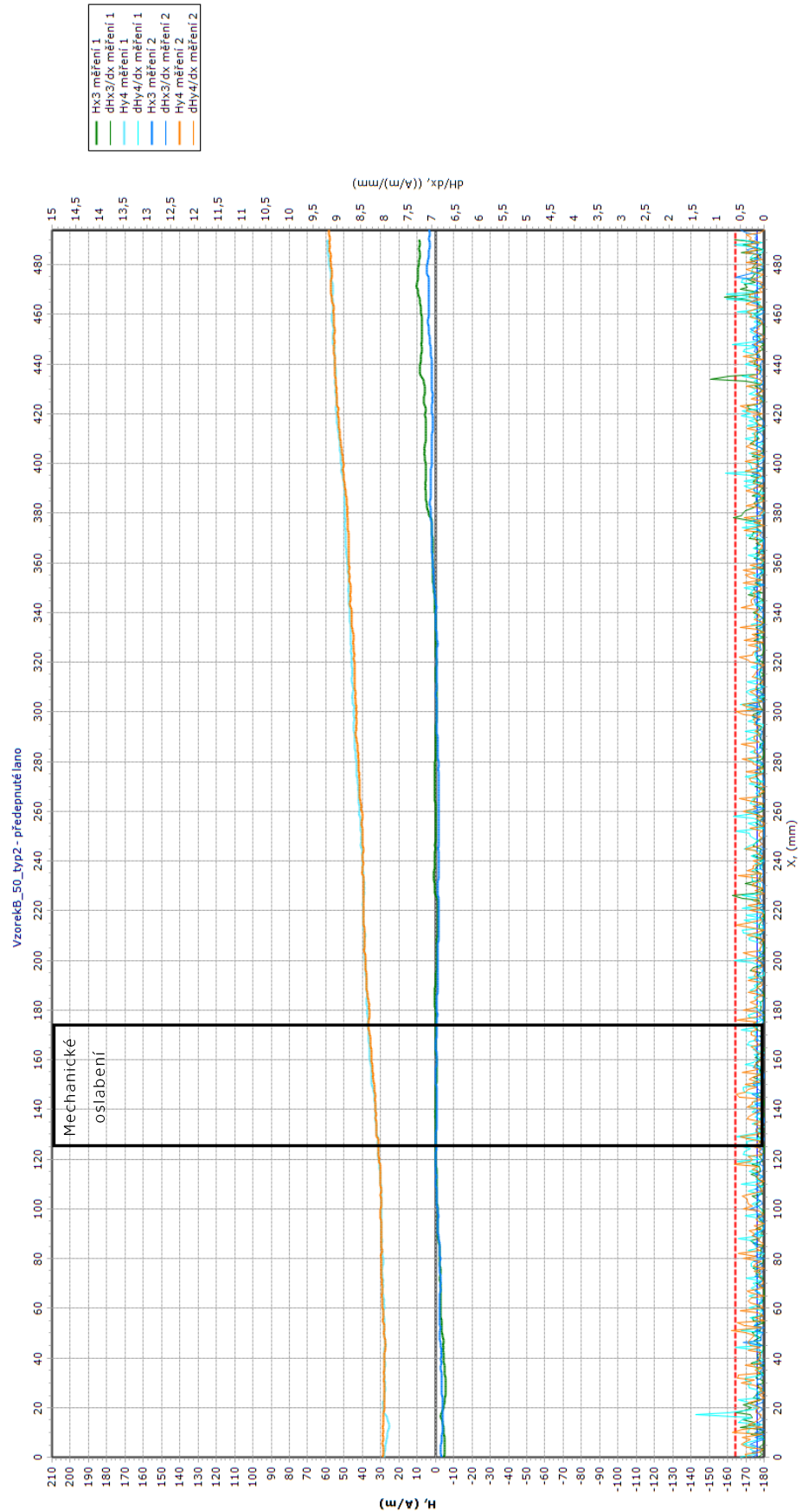
U nepředepnutého lana je průběh intenzity magnetického pole téměř konstantní. Lze pozorovat 2 drobné změny intenzity magnetického pole, ale jejich výskyt je spíše nepřesností při měření. Po předepnutí lana se hodnoty intenzity magnetického pole ve směru y zvýšily, ale celkový průběh zůstal téměř konstantní. K výrazné změně došlo při ohybové zkoušce. Průběh intenzity magnetického pole se výrazně změnil. Tvarem ukazuje na vznik SCZ uprostřed měření. Změna intenzity magnetického pole není příliš veliká, ale její přítomnost byla potvrzena oběma sondami. V místě oslabení se však neprojevil změna intenzity magnetického pole, která by značila SCZ.



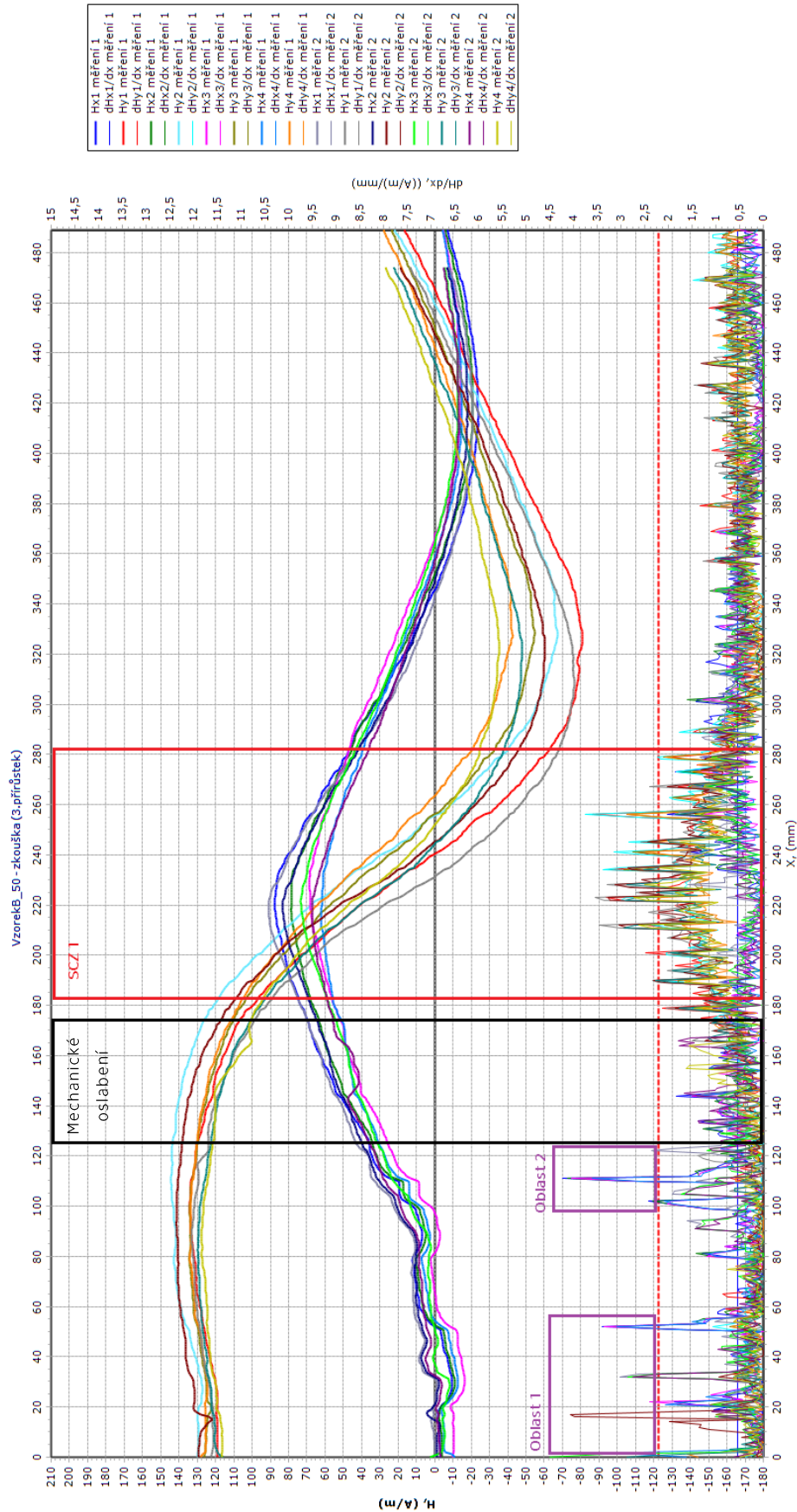
Obr. 81 Výsledky měření-vzorek B



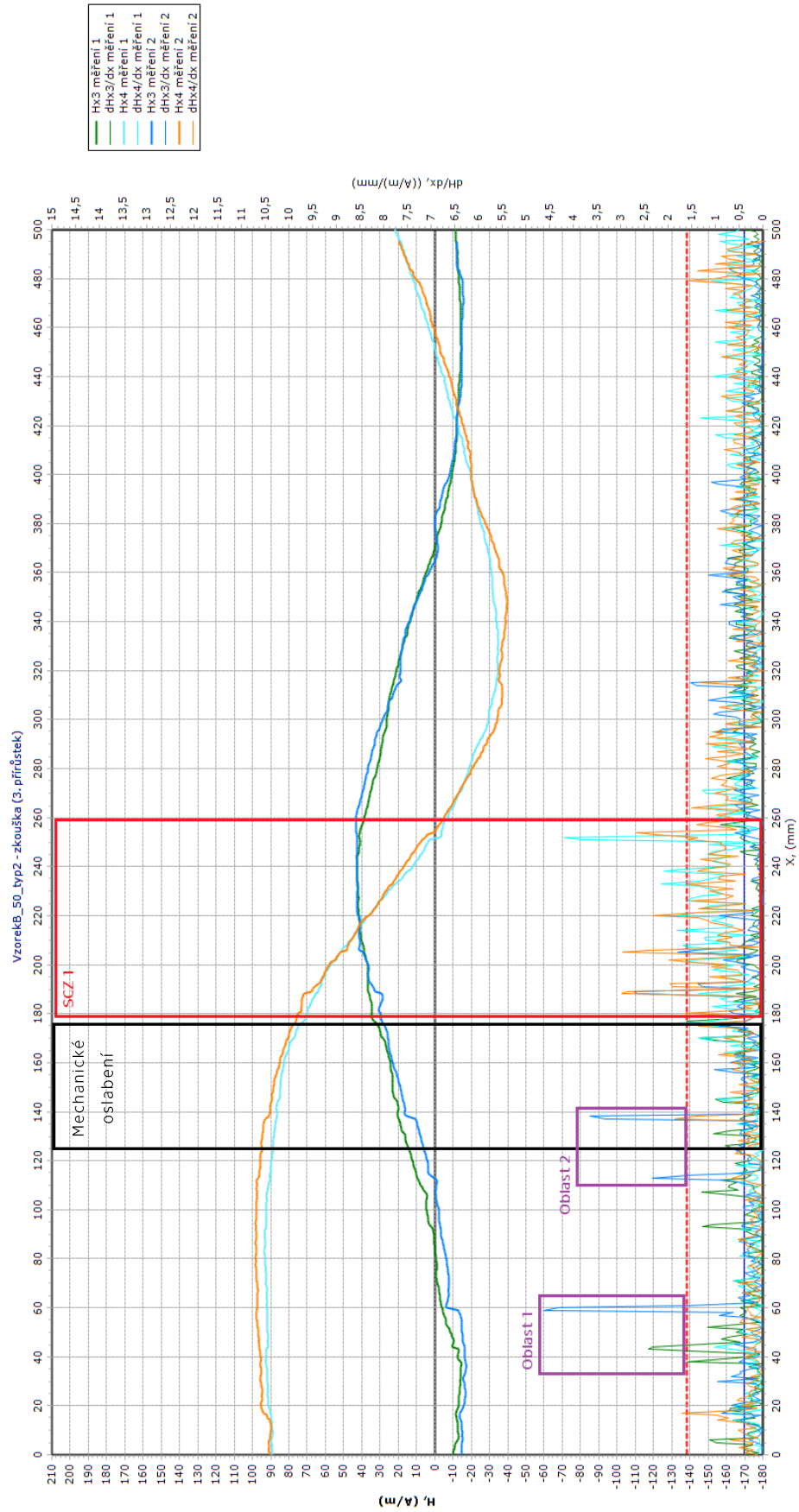
Obr. 82 Výsledky měření-vzorek B



Obr. 83 Výsledky měření-vzorek B



Obr. 84 Výsledky měření-vzorek B



Obr. 85 Výsledky měření-vzorek B



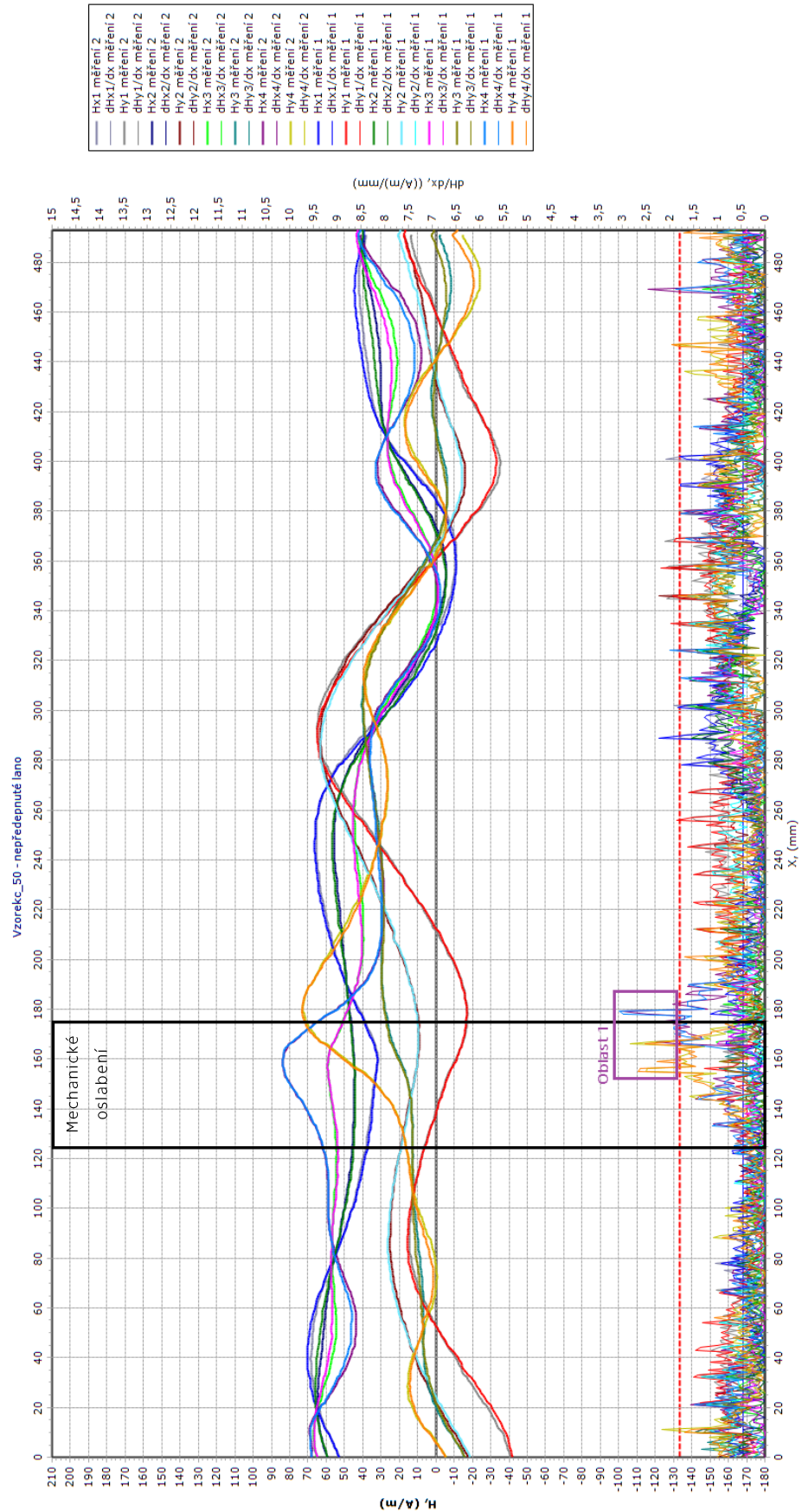
6.2.3 Vzorek C

- oslabení 1 mm
- PE chránička
- kovová výztuže

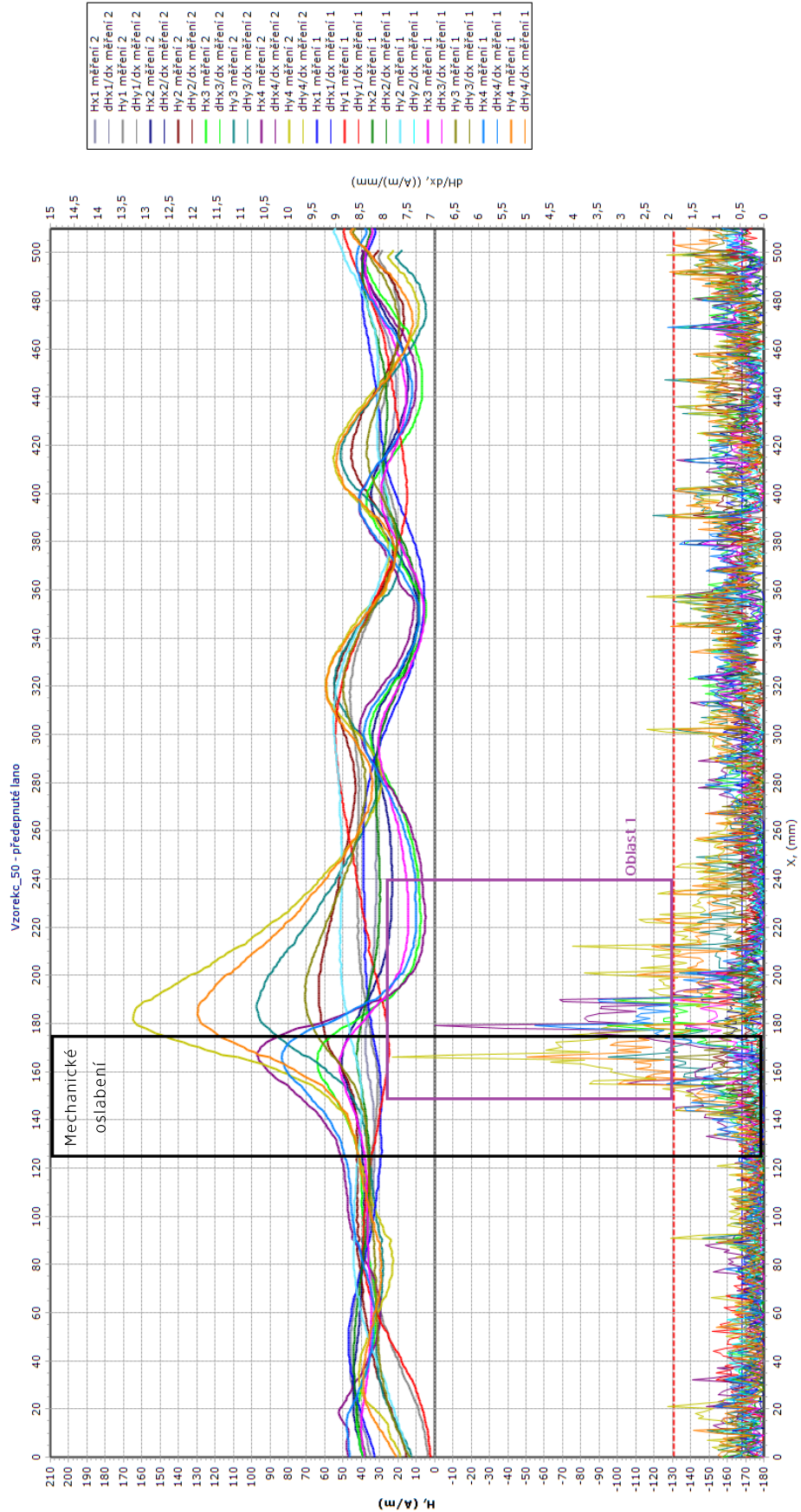
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	804	653
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	35	816	669
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	70	936	794
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	105	1234	1077
5. měření magnetické odezvy			
zkouška - 4.přírůstek	140	1962	1432
6. měření magnetické odezvy			

Tab. 14 Postup měření vzorek C

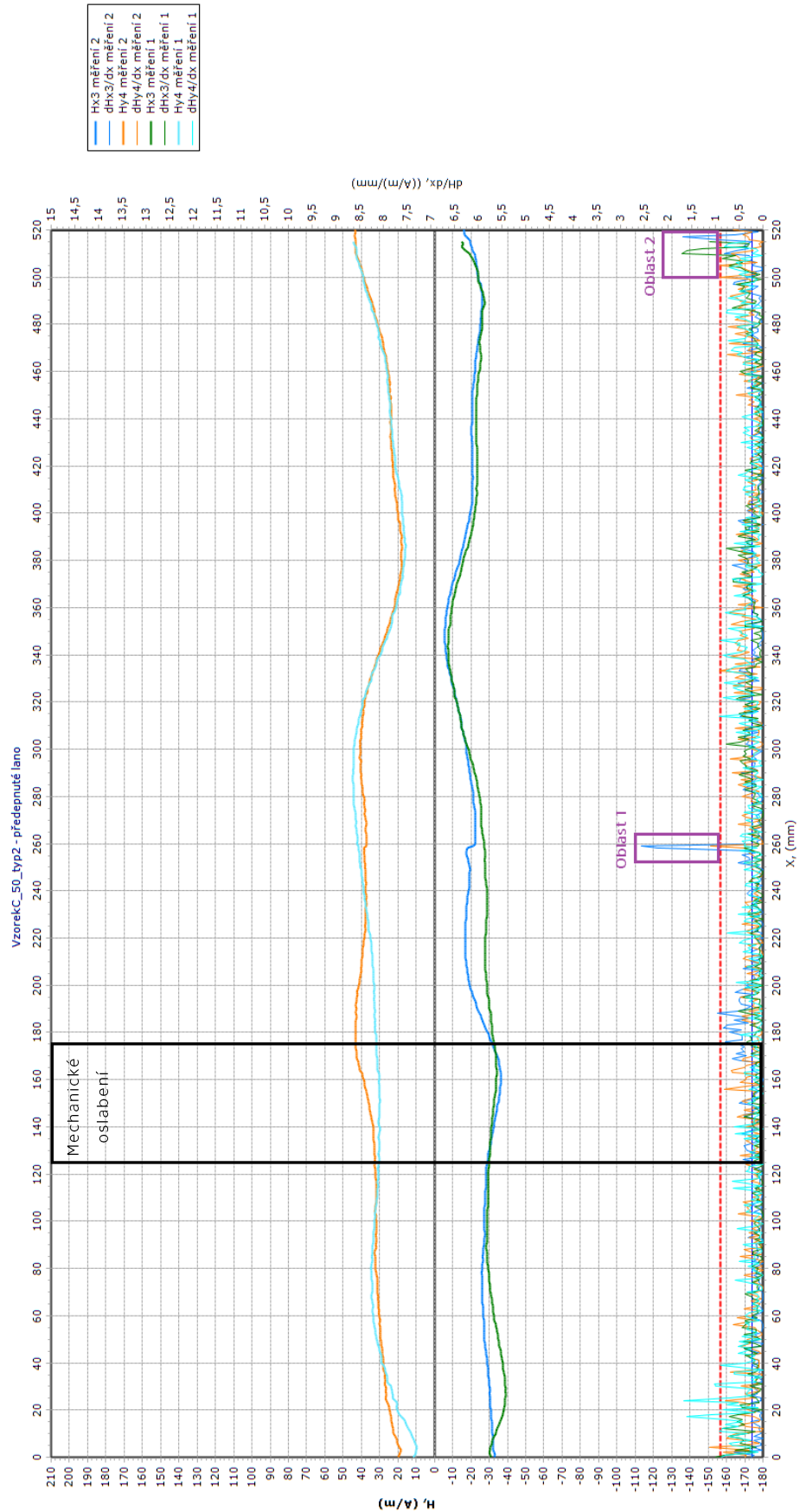
U nepředepnutého vzorku C má intenzita magnetického pole sinusový tvar bez výrazné změny intenzity. Po předepnutí vzorku došlo ke změně průběhu intenzity magnetického pole. V místě 180 mm od začátku měření se hodnoty zvýšily, což vede k výrazné změně intenzity magnetického pole. Pro porovnání je zde uvedené výsledné měření sondou typ 2. Zvýšené hodnoty jsou naměřeny pouze krajními sondami a mohou být ovlivněny přidanou kovovou výztuží. Výsledky měřené sondou typ 2 mají téměř konstantní průběh. Při zatěžovací zkoušce se křivky intenzity magnetického pole výrazně změnily, ale nepřinesly žádnou podstatnou změnu intenzity. U vzorku C se v místě oslabení nevyskytují SCZ.



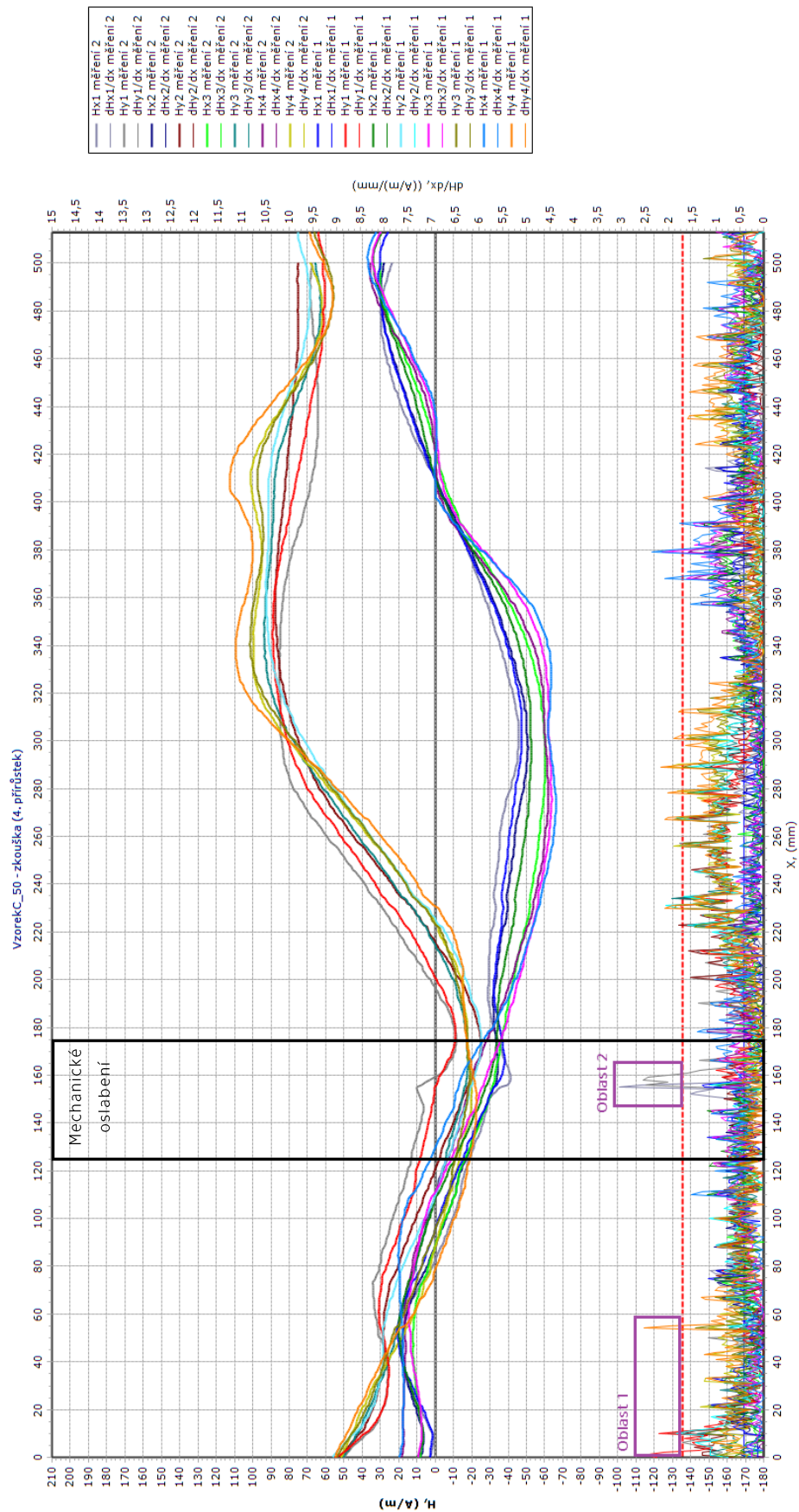
Obr. 86 Výsledky měření-vzorek C



Obr. 87 Výsledky měření-vzorek C



Obr. 88 Výsledky měření-vzorek C



Obr. 89 Výsledky měření-vzorek C



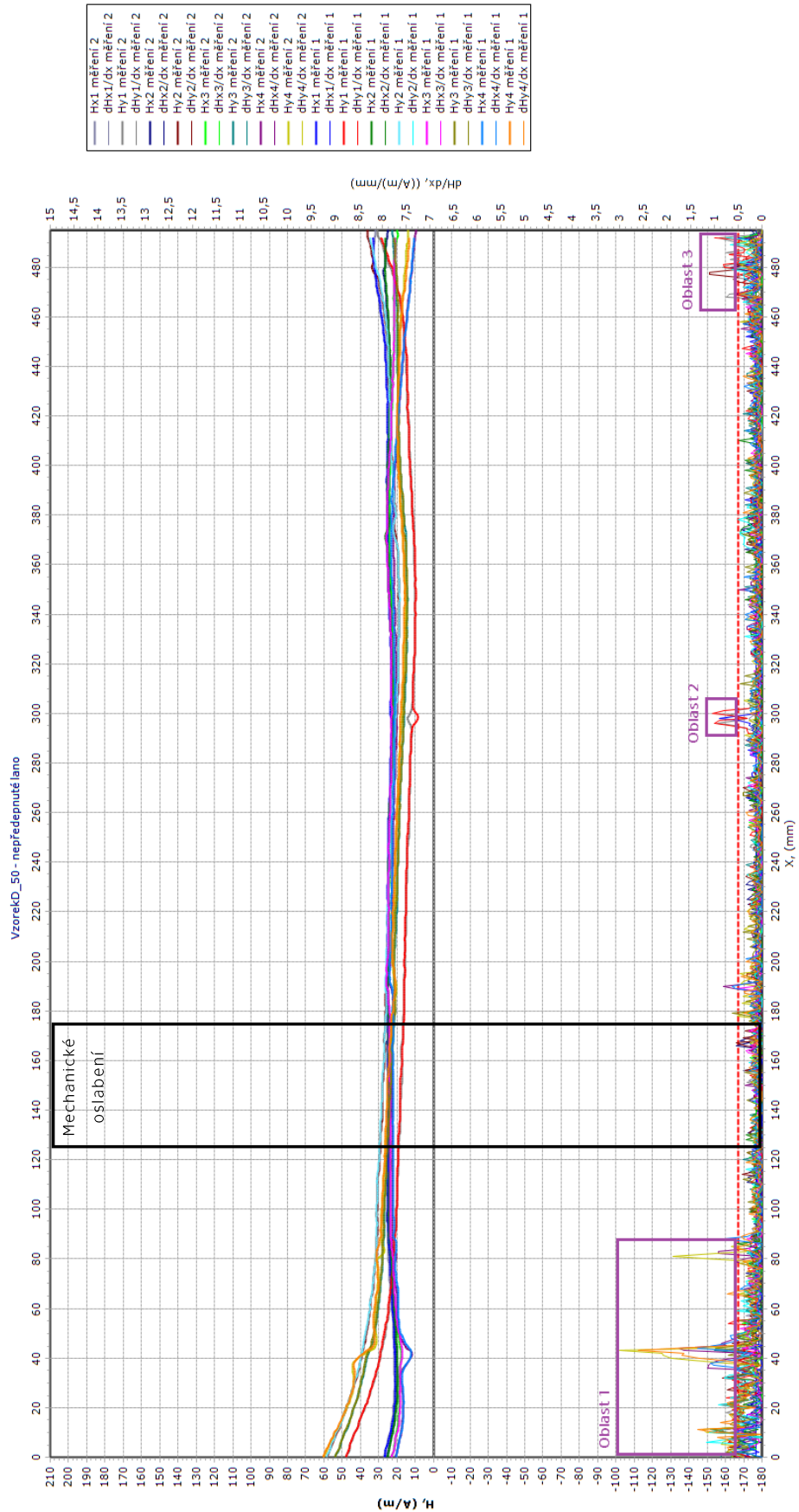
6.2.4 Vzorek D

- oslabení 1 mm
- PE chránička
- bez kovové výztuže

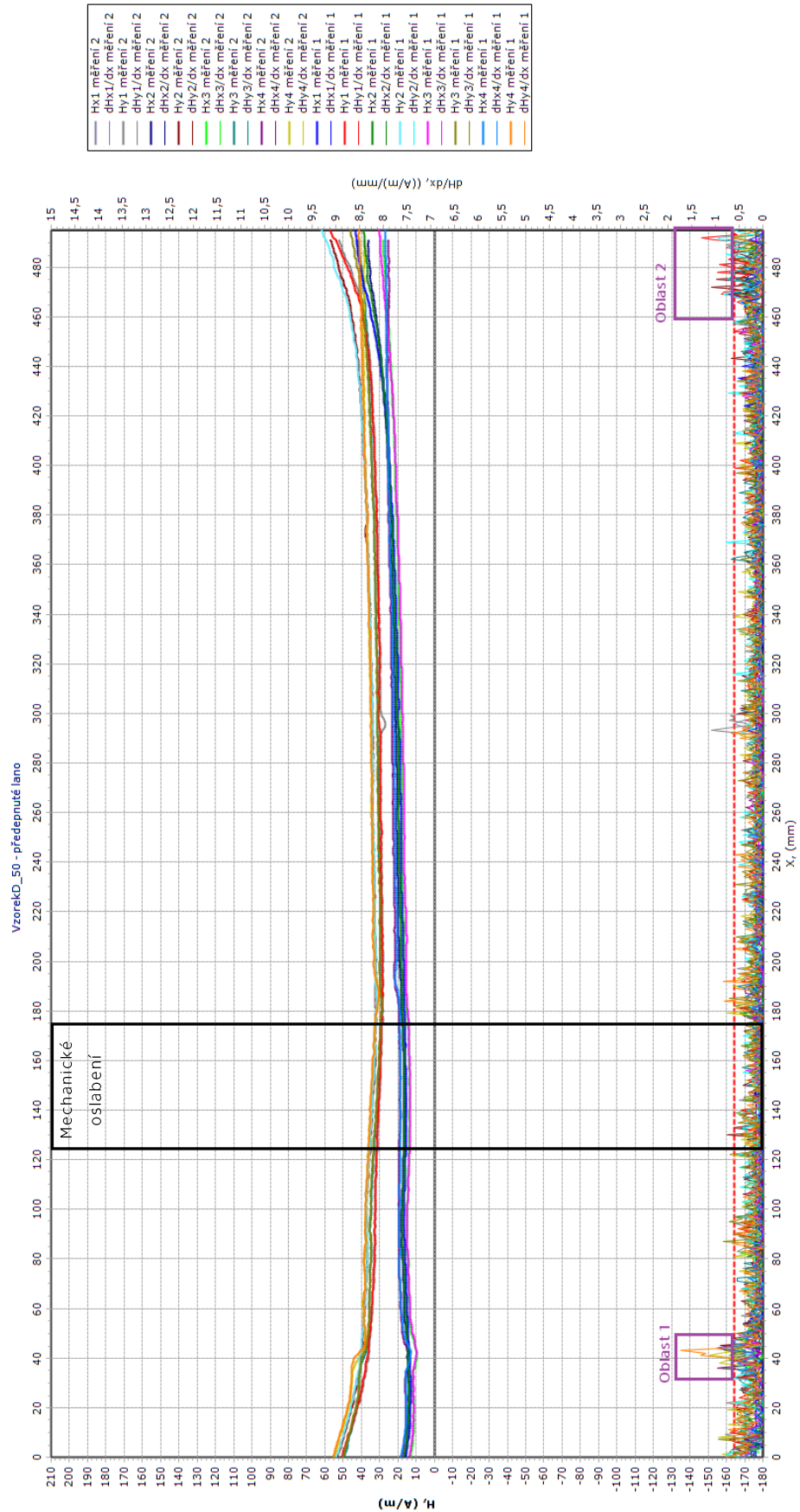
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	957	700
2. měření magnetické odezvy			

Tab. 15 Postup měření vzorek D

Z důvodu nepříznivých výsledků se vzorek D pouze předepnul a následně se ponechal pro další výzkumnou činnost. U nepředepnutého lana má intenzita magnetického pole téměř konstantní průběh a nevykazuje žádné výrazné změny intenzity magnetického pole. Po předepnutí se zvýšily hodnoty ve směru y, ale zůstaly konstantní. U vzorku D nebyly zjištěny SCZ v místě oslabení předpínací výztuže.



Obr. 90 Výsledky měření-vzorek D



Obr. 91 Výsledky měření-vzorek D



6.2.5 Vzorek E

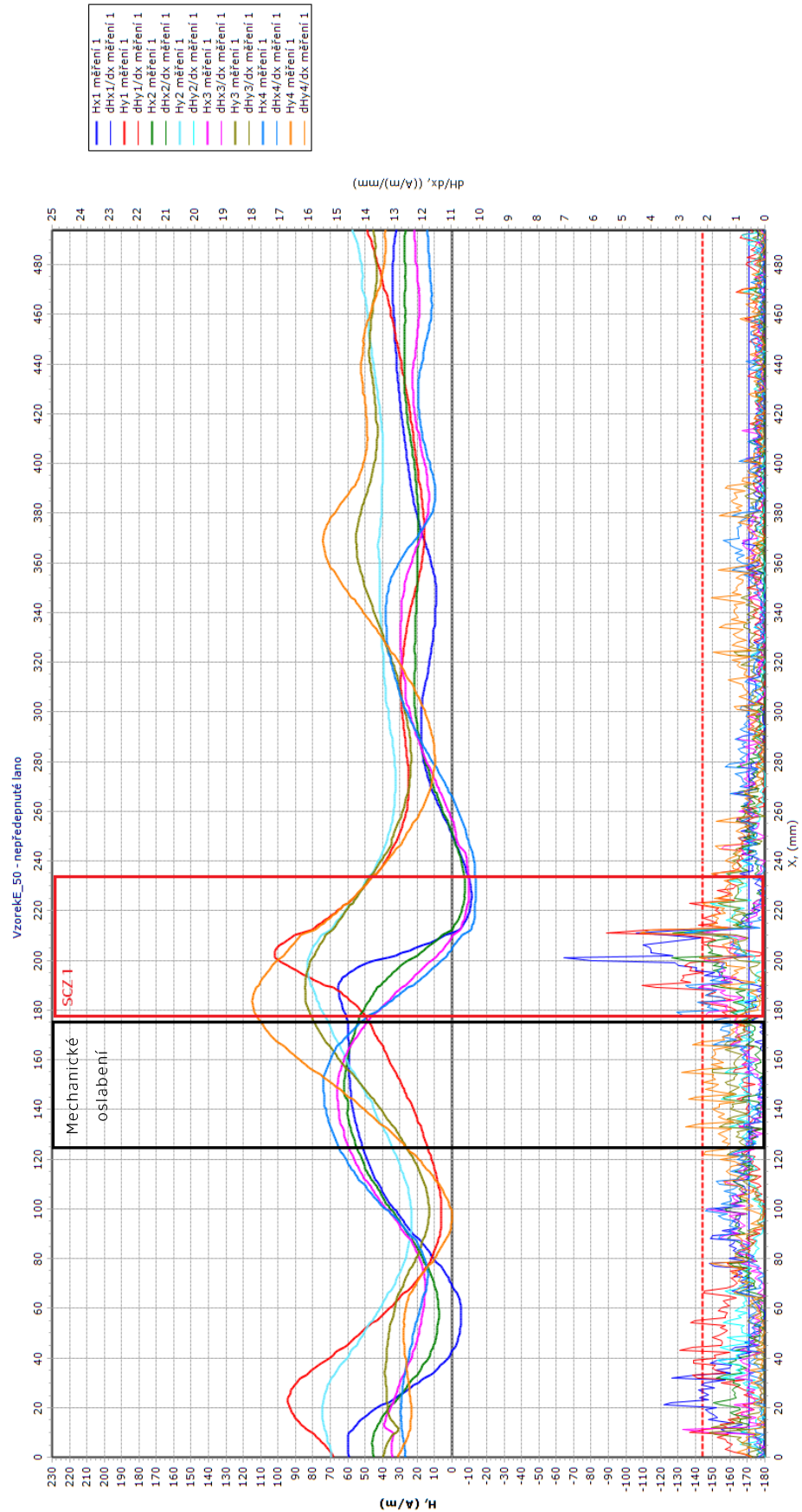
- oslabení 2 mm
- kovová chránička
- kovová výztuž

	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	1081	-
zkouška - 1.přírůstek	30	1106	-
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	60	1520	-
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	100	-	-
4. měření magnetické odezvy			
5. měření magnetické odezvy-po přetržení lana			

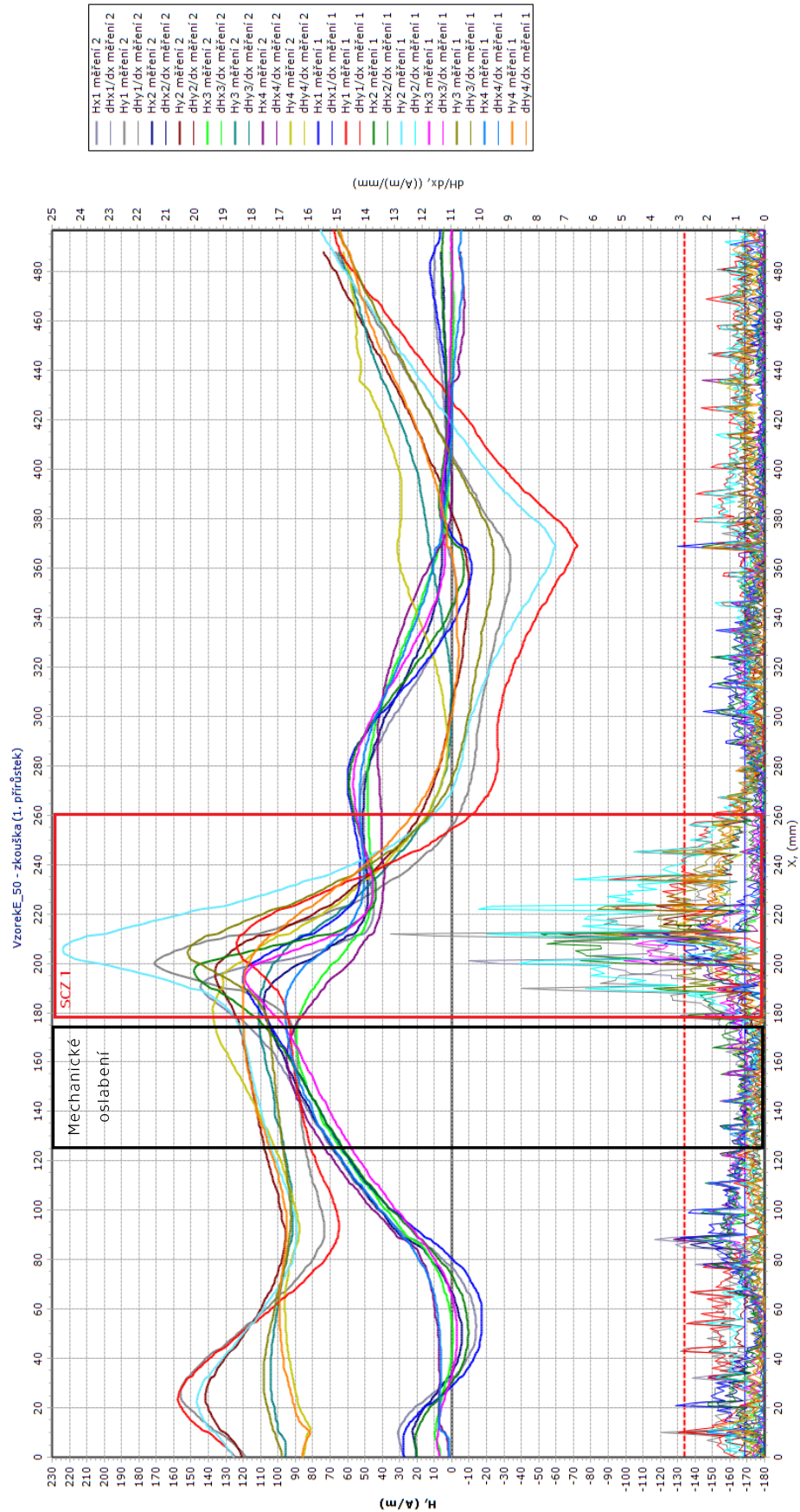
Tab. 16 Postup měření vzorek E

Při vyhodnocování naměřených hodnot došlo k znehodnocení výsledků předepnutého lana. Jsou zde místo toho uvedeny hodnoty při prvním přírůstku zatěžování.

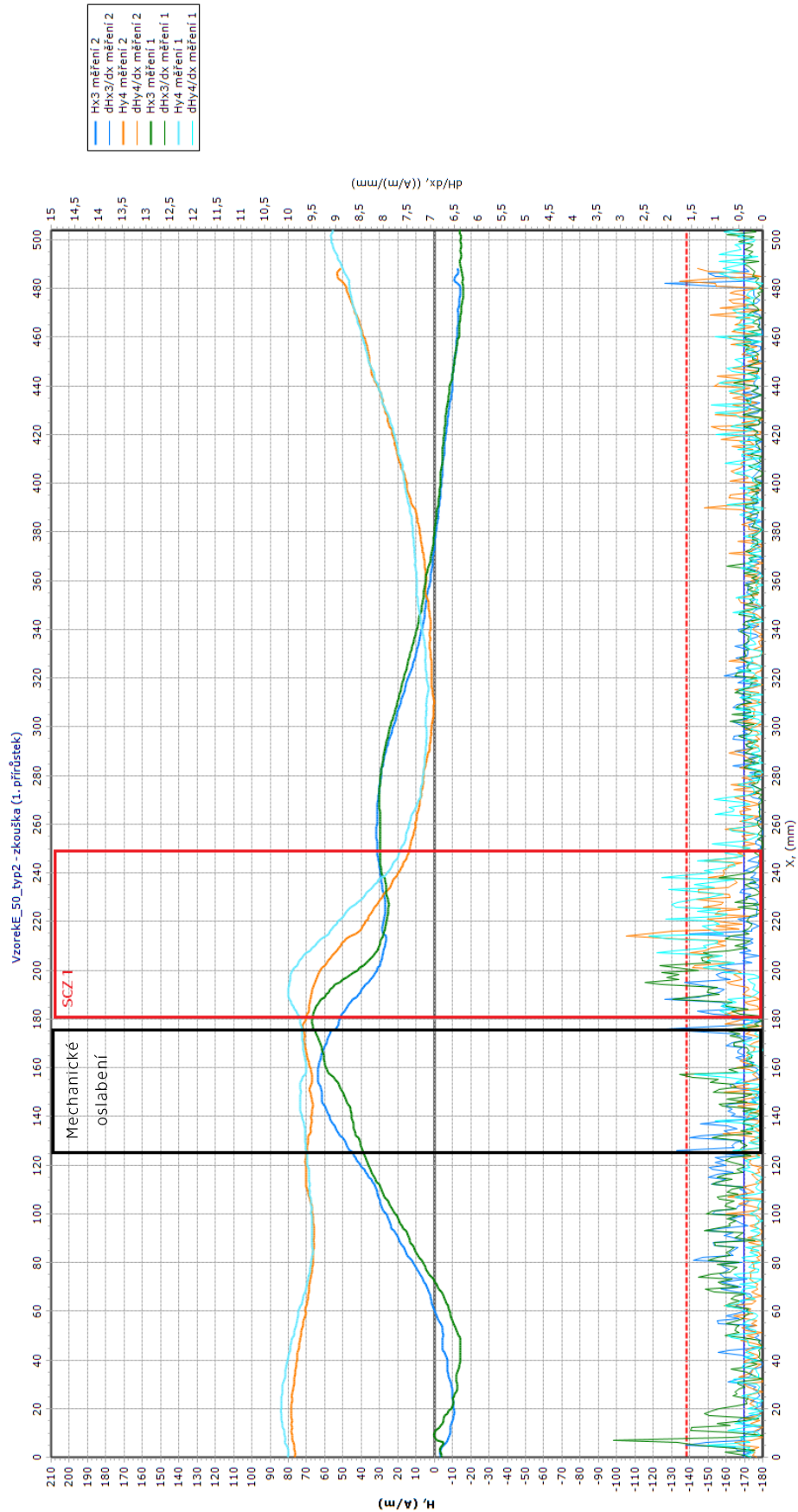
U nepředepnutého lana má průběh intenzity magnetického pole nepravidelný sinusový tvar. V místě za mechanickým oslabením výztuže byla detekovaná mírná změna intenzity magnetického pole. Ta se výrazněji projevila při prvním přírůstku zatěžovací zkoušky. Při měření sondou typ 2 byla tato změna naměřena také, ale výrazně nižší. Graf intenzity magnetického pole se v průběhu zatěžovací zkoušky příliš neměnil. U vzorku E se podařilo detekovat SCZ, které bylo mimo mechanické opracování.



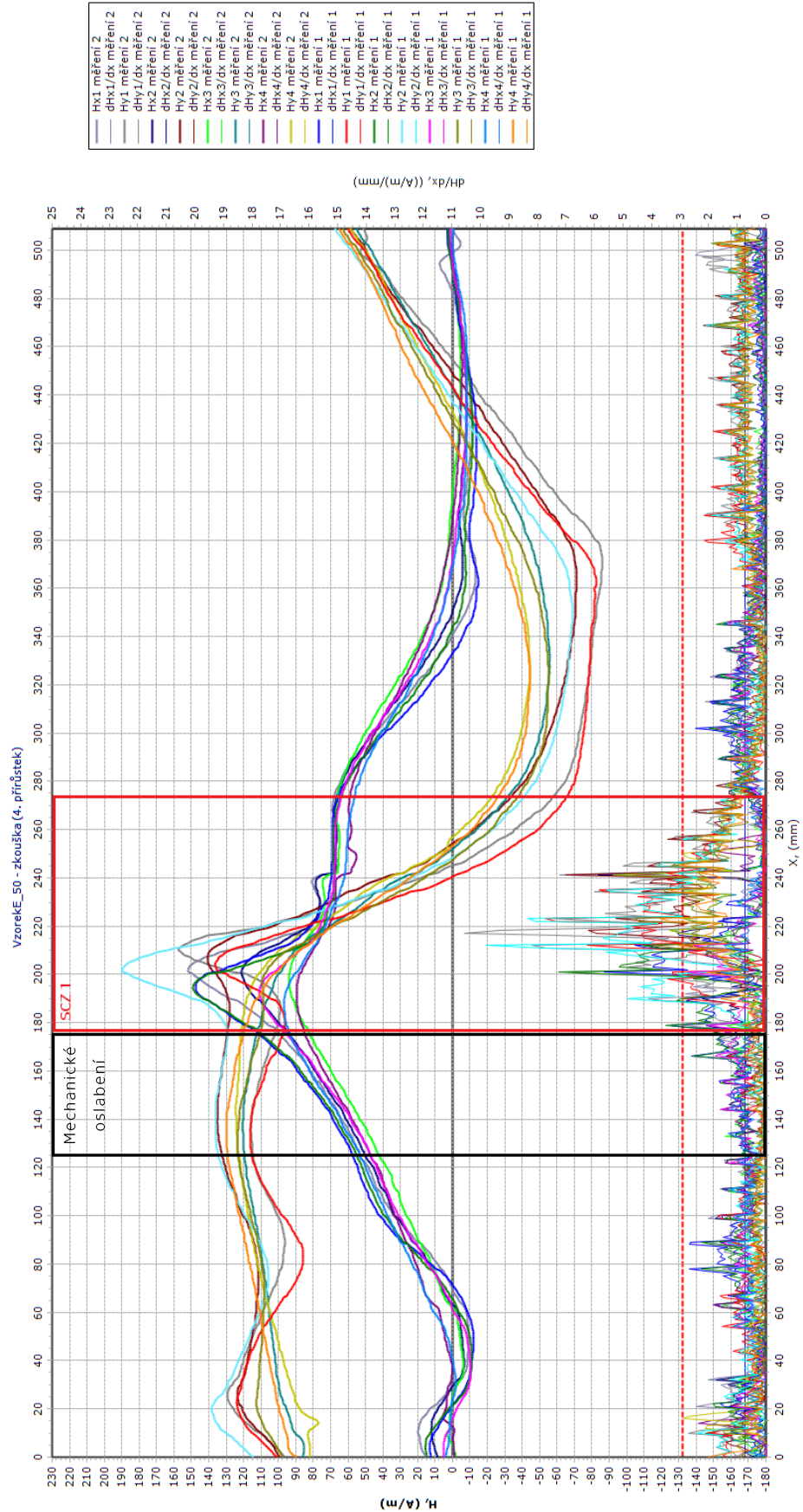
Obr. 92 Výsledky měření-vzorek E



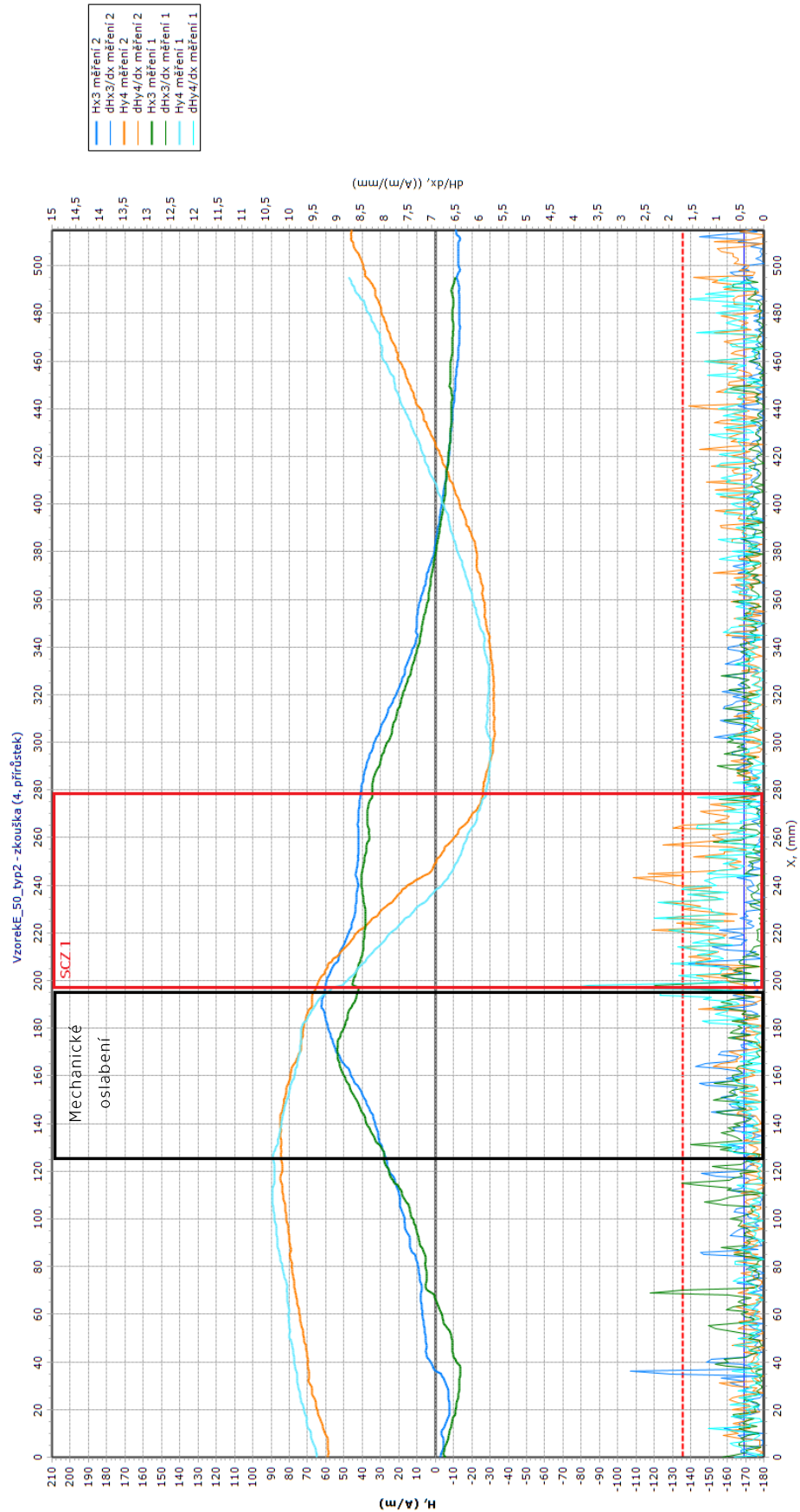
Obr. 93 Výsledky měření-vzorek E



Obr. 94 Výsledky měření-vzorek E



Obr. 95 Výsledky měření-vzorek E



Obr. 96 Výsledky měření-vzorek E



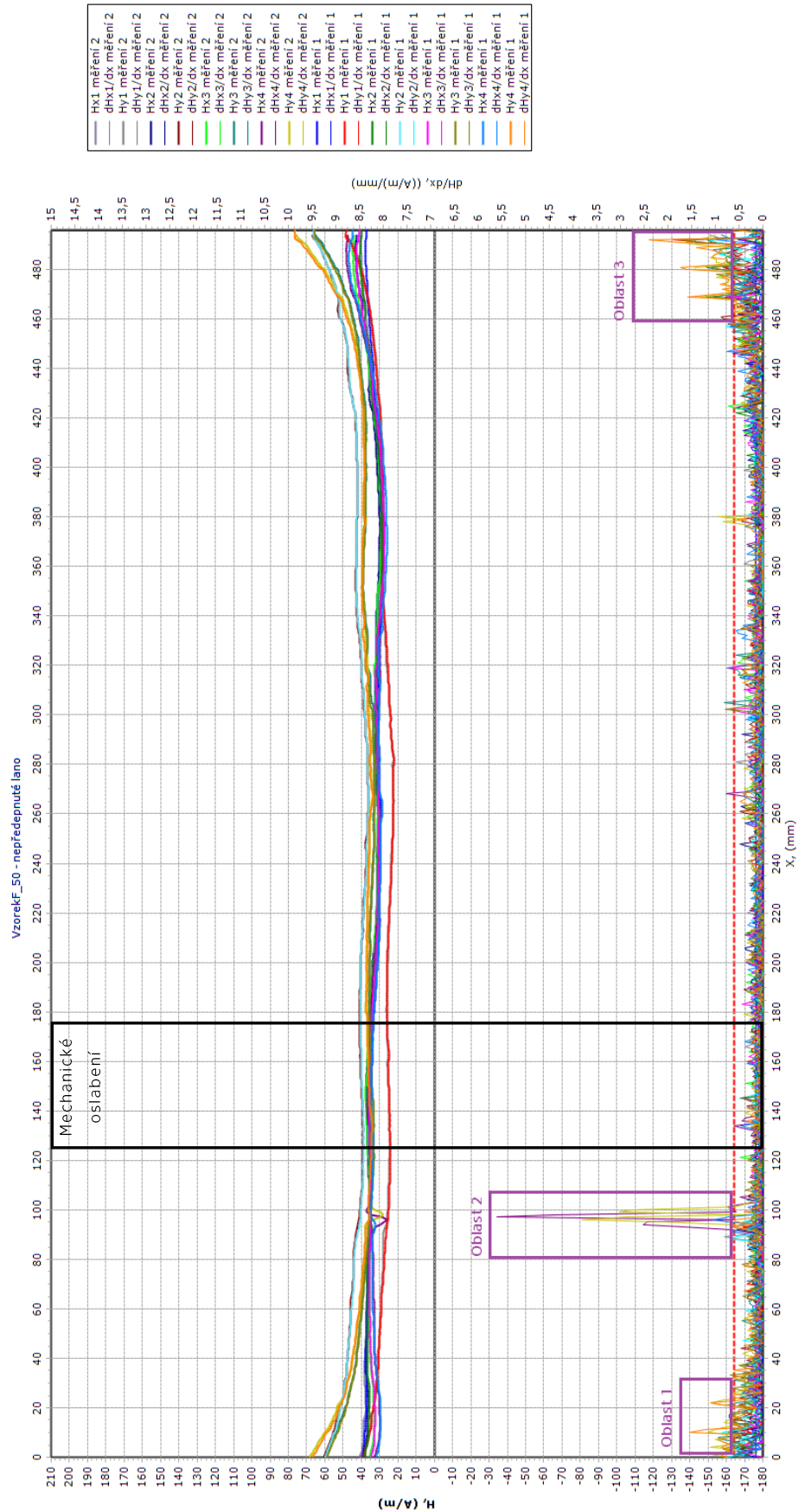
6.2.6 Vzorek F

- oslabení 2 mm
- kovová chránička
- bez kovové výztuže

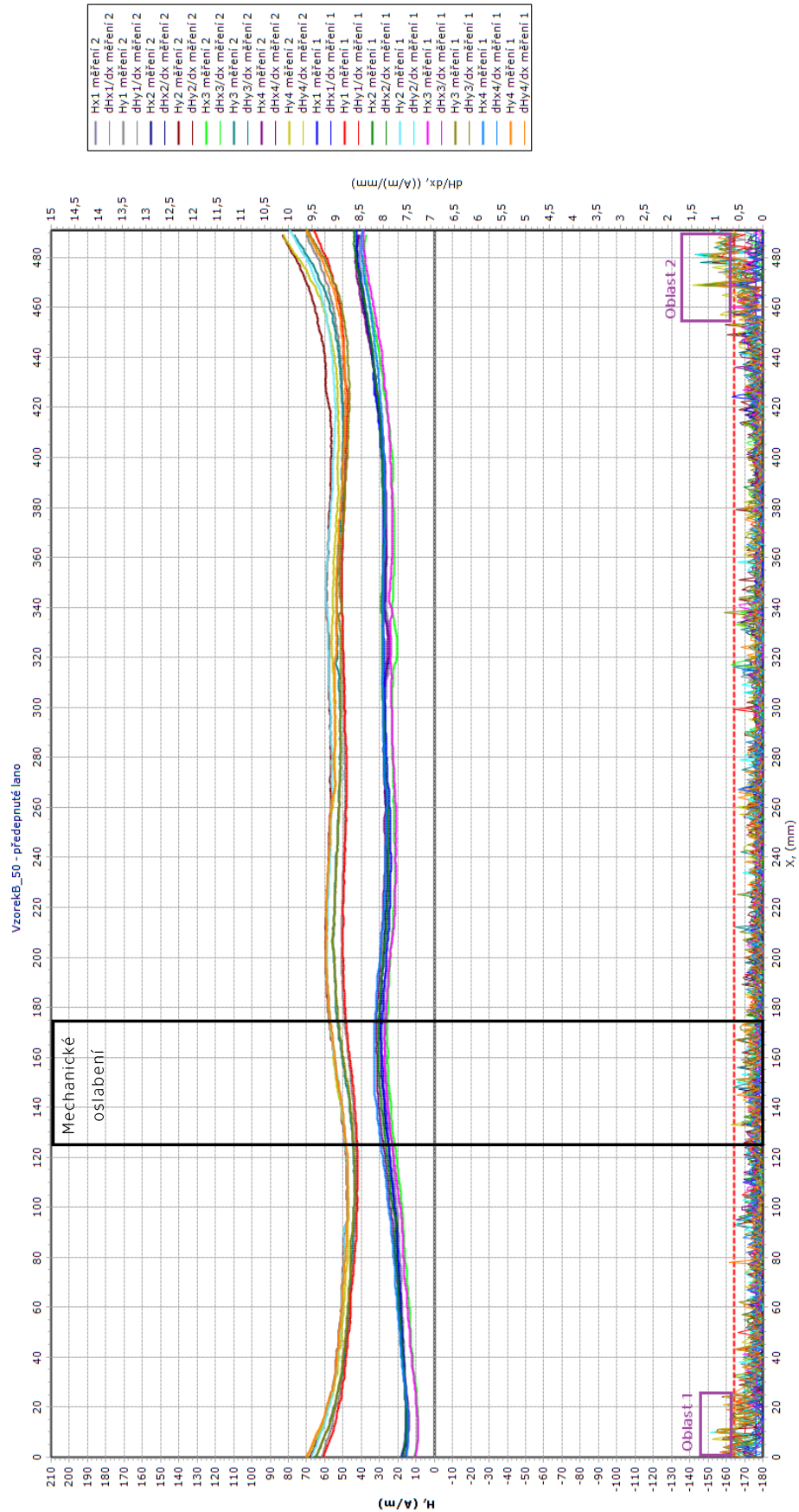
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	1639	521
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	30	1666	539
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	60	-	739
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	90	-	-
5. měření magnetické odezvy			
zkouška - 4.přírůstek	100	-	-
6. měření magnetické odezvy			
zkouška - 5.přírůstek	115	-	-

Tab. 17 Postup měření vzorek F

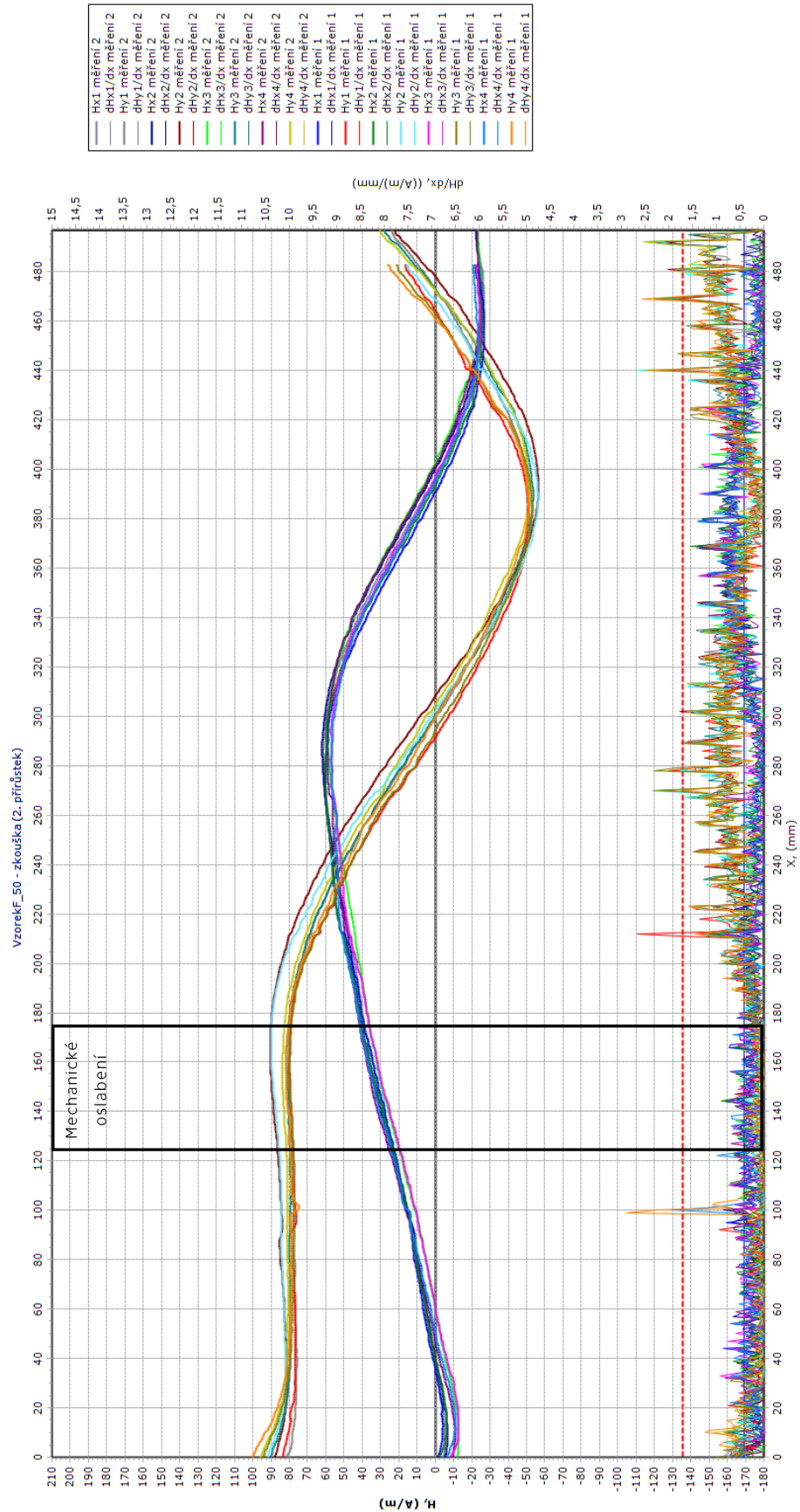
Průběh intenzity magnetického pole je u nepředepnutého vzorku konstantní. Následně po předepnutí došlo k zvýšení hodnot v měřeném směru y, ale průběh zůstal konstantní. Při posledním přírůstku u zatěžovací zkoušky se hodnoty ve směru x snížily. Intenzita magnetického pole u vzorku D se v průběhu měnila, ale průběh zůstal přibližně konstantní. Výrazné změny intenzity magnetického pole nebyly zjištěny. U vzorku F se nepodařilo lokalizovat SCZ v místě oslabení předpínací výztuže.



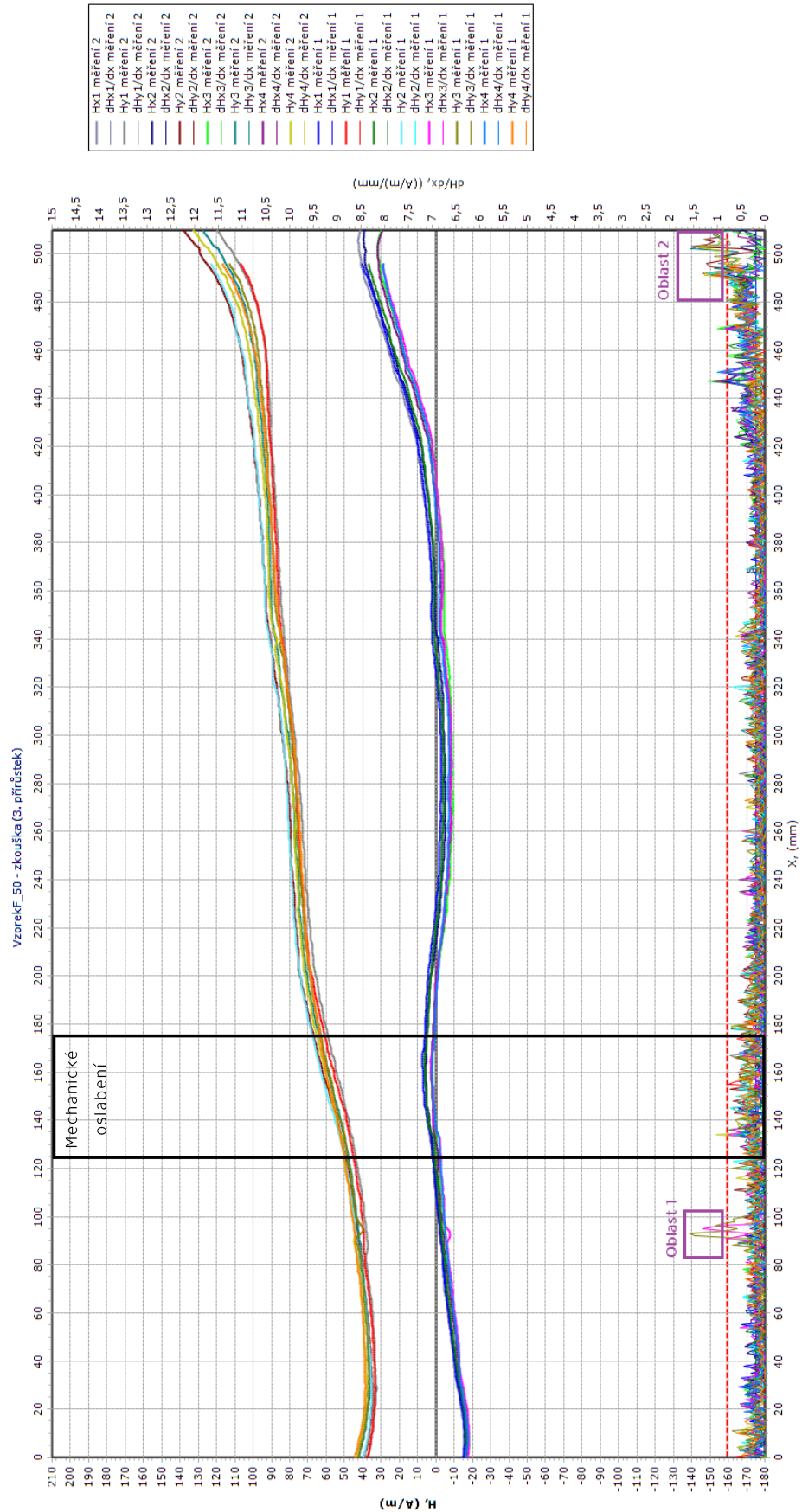
Obr. 97 Výsledky měření-vzorek F



Obr. 98 Výsledky měření-vzorek F



Obr. 99 Výsledky měření-vzorek F



Obr. 100 Výsledky měření-vzorek F



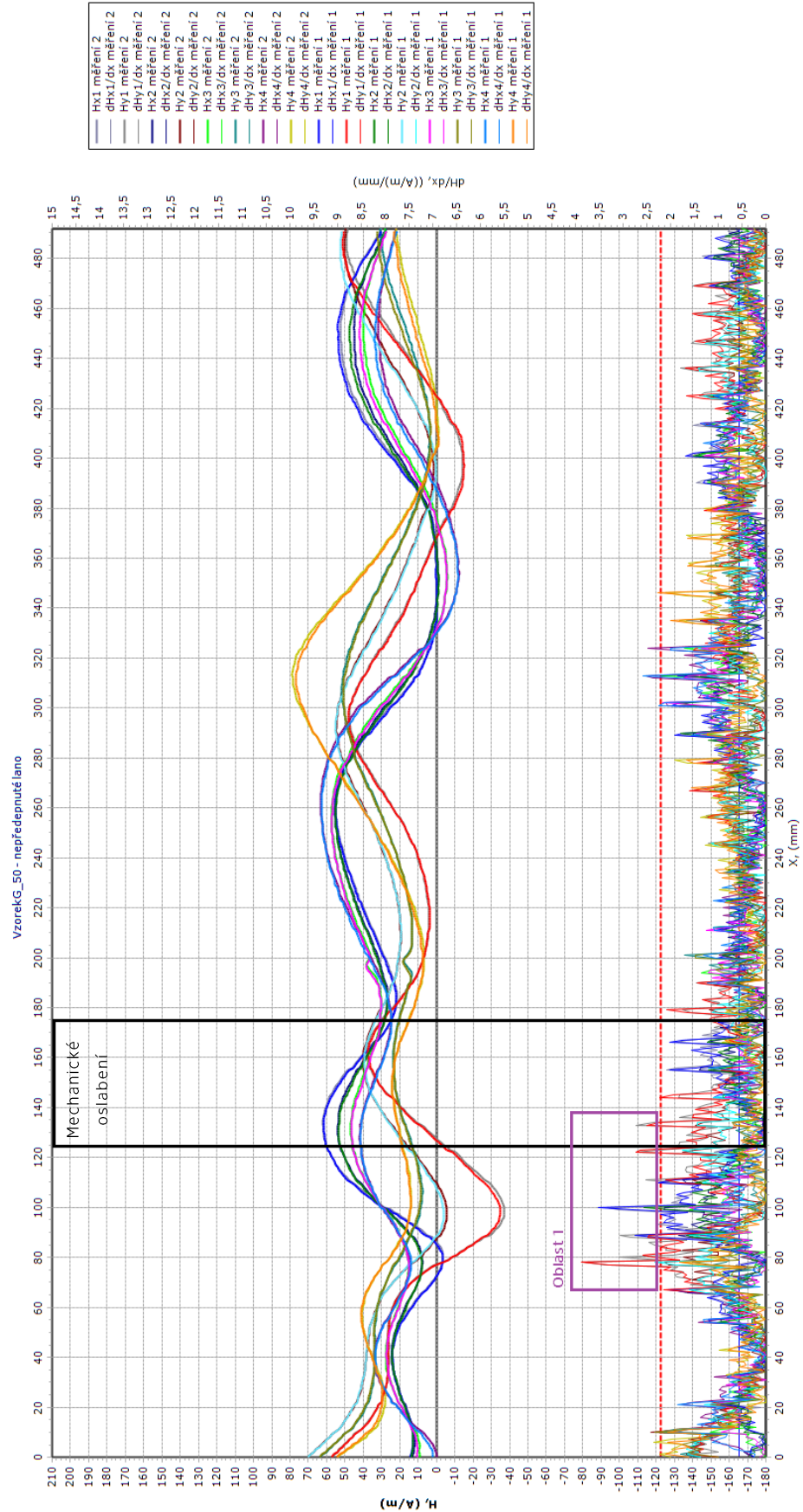
6.2.7 Vzorek G

- oslabení 2 mm
- PE chránička
- kovová výztuž

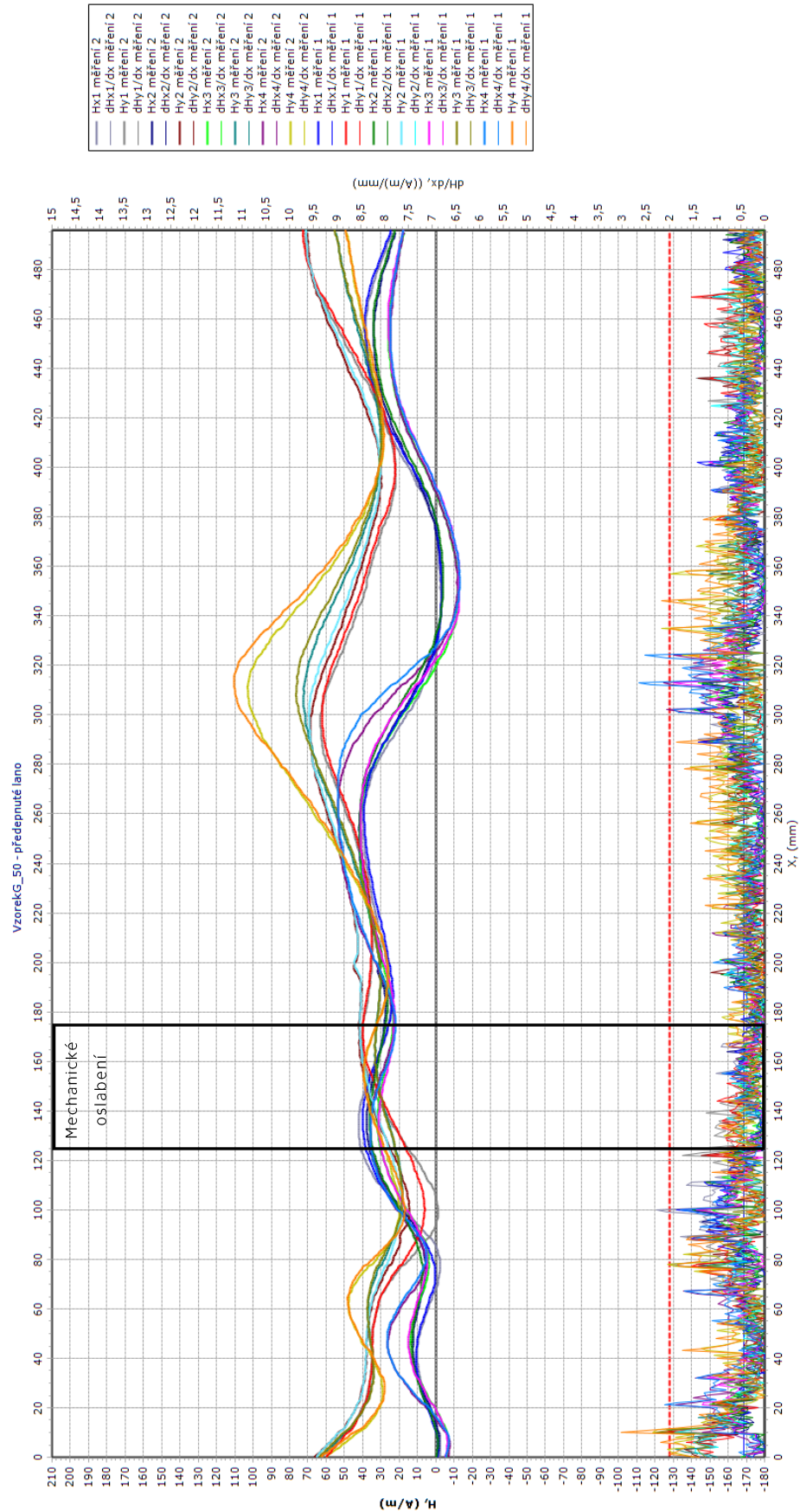
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	-	471
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	30	-	480
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	60	-	600
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	100	-	-
5. měření magnetické odezvy			
6. měření magnetické odezvy-po přetržení lana			

Tab. 18 Postup měření vzorek G

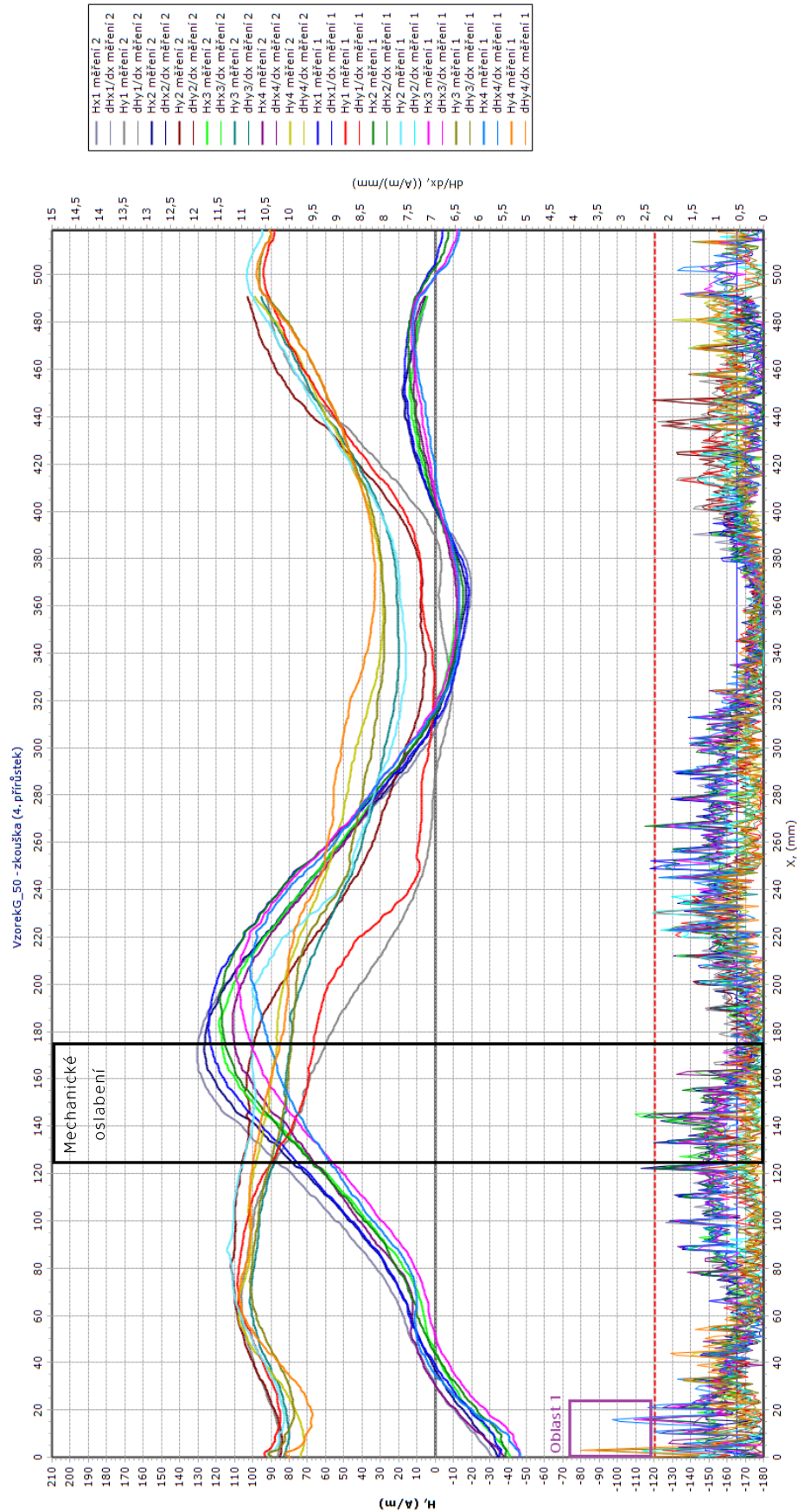
U vzorku G s nepředepnutým lanem má průběh intenzity magnetického pole sinusový tvar. Po předepnutí došlo k mírnému vyhlazení vln v první části. Při zatěžování se graf výrazně změnil. U vzorku G nebyla zjištěna zóna koncentrace napětí v místě oslabení.



Obr. 101 Výsledky měření-vzorek G



Obr. 102 Výsledky měření-vzorek G



Obr. 103 Výsledky měření-vzorek G



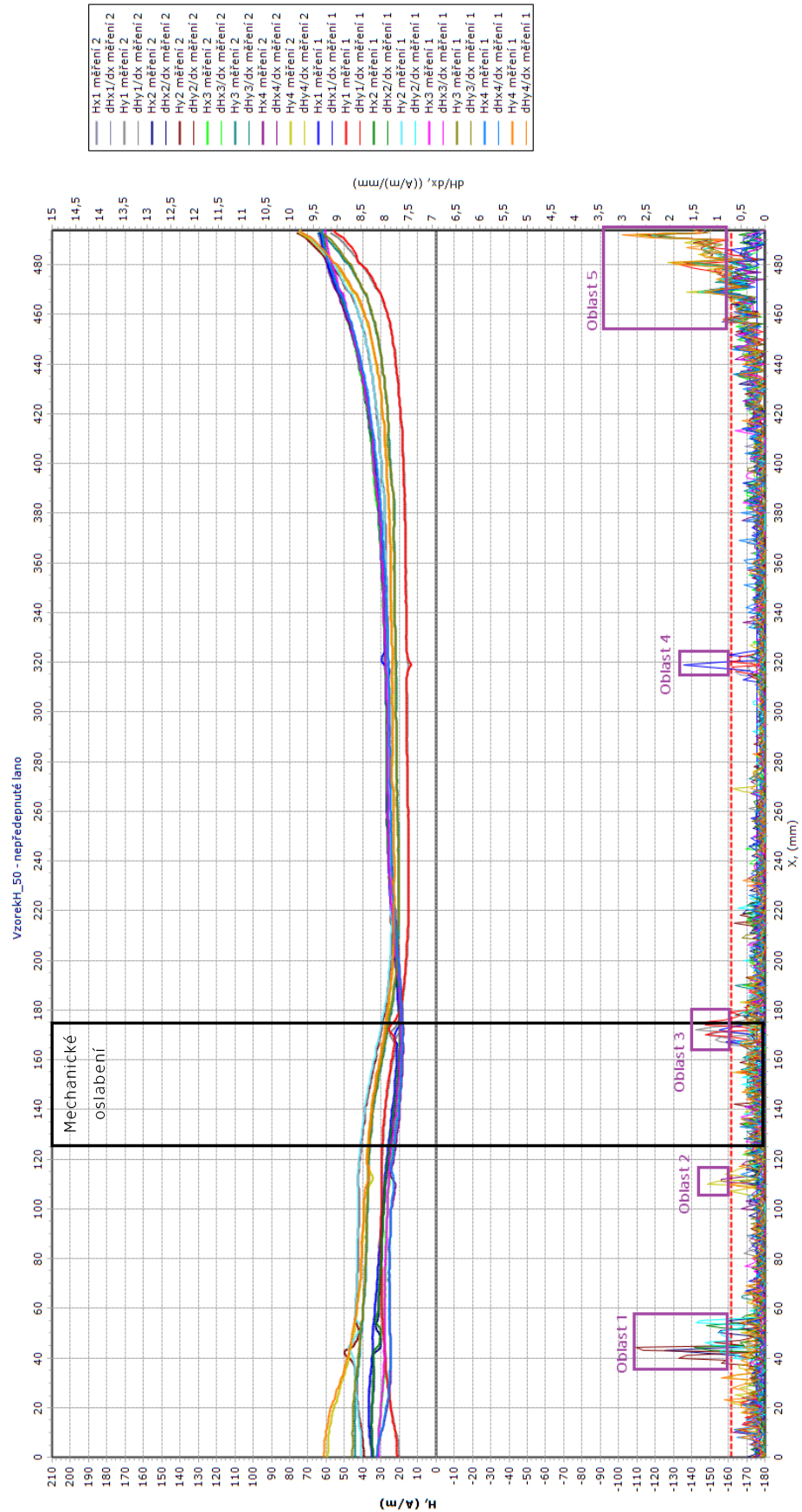
6.2.8 Vzorek H

- oslabení 2 mm
- PE chráničku
- bez kovové výztuže

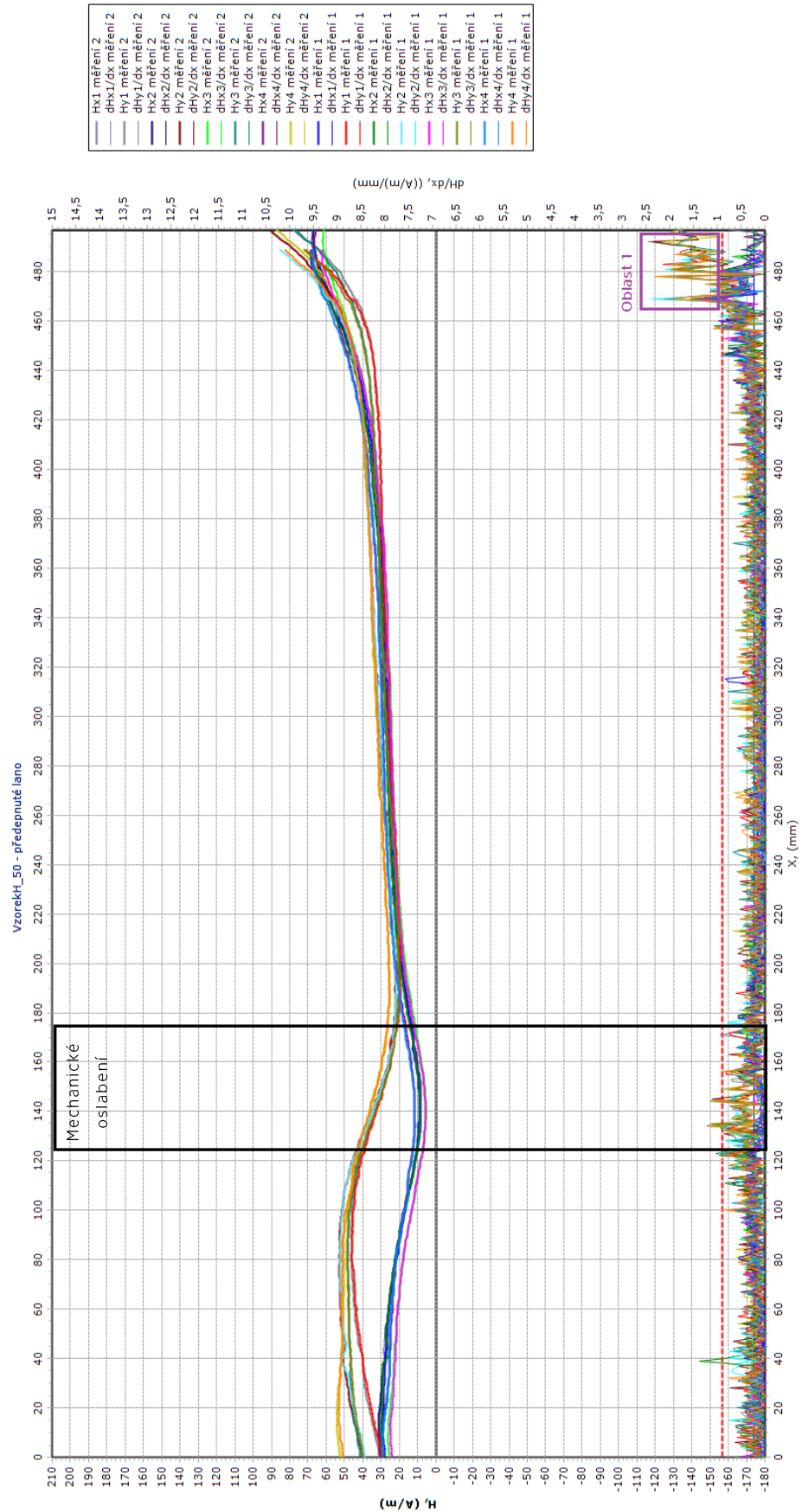
	zatěžovací síla [kN]	napětí oslabený průřez [MPa]	napětí neoslabený průřez [MPa]
nepředepnuté vzorky	0	0	0
1. měření magnetické odezvy			
předepnuté vzorky	0	-	424
2. měření magnetické odezvy			
zkouška - 1.přírůstek	30	-	434
3. měření magnetické odezvy			
zkouška - 2.přírůstek	60	-	531
4. měření magnetické odezvy			
zkouška - 3.přírůstek	90	-	-
5. měření magnetické odezvy			

Tab. 19 Postup měření vzorek H

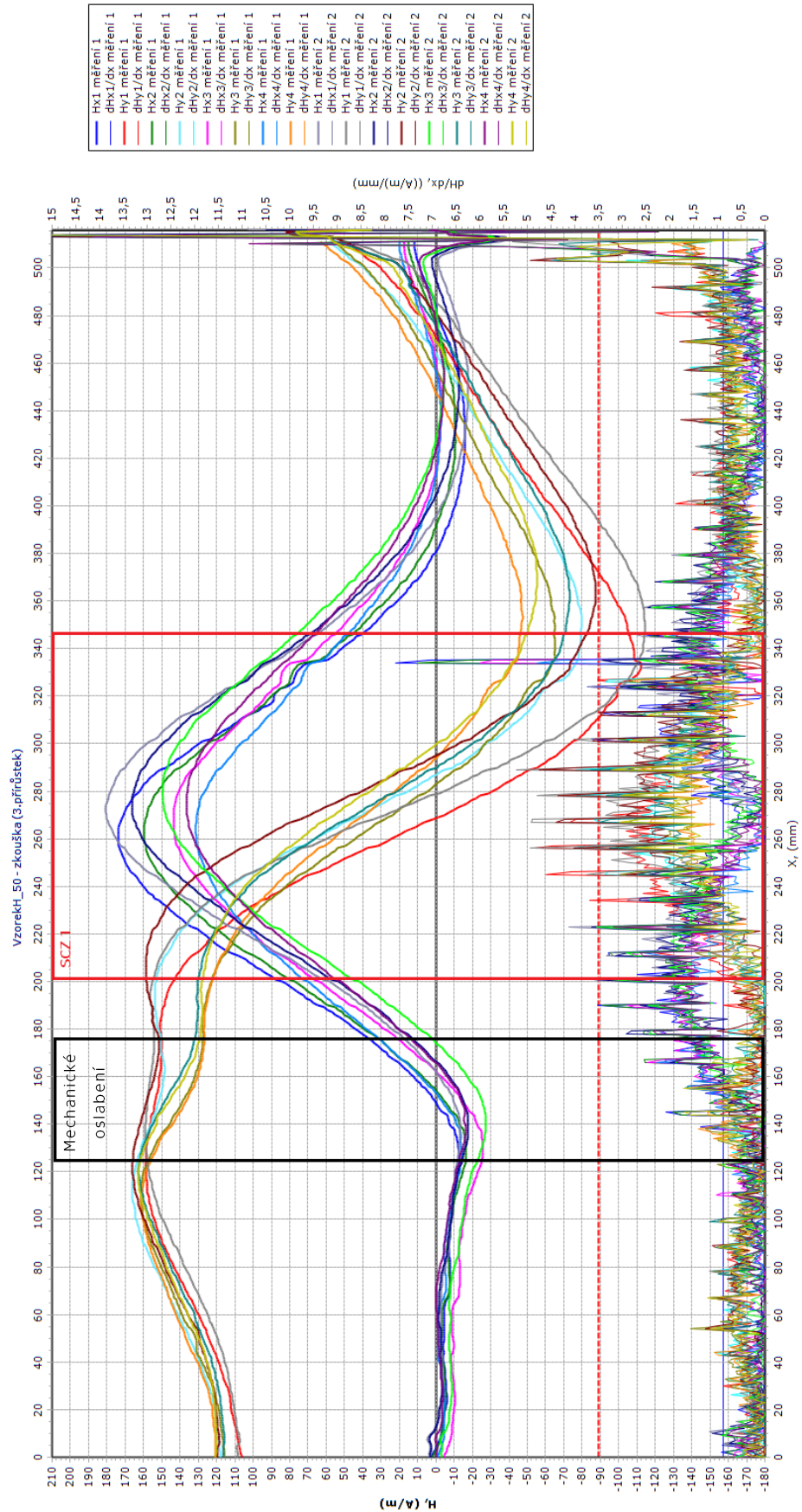
U nepředepnutého vzorku H jsou průběhy intenzit magnetického pole téměř konstantní. Oblasti změny magnetického pole jsou velmi malé a mohou být způsobeny nepřesností při měření. Po vnesení předpětí se hodnoty intenzity téměř nezměnily, avšak v první části grafu hodnoty ve směru y mírně narostly a ve směru x se mírně snížily. Při zatěžovací zkoušce došlo k nárůstu hodnot intenzity magnetického pole a průběh grafu se výrazně změnil. Je detekovaná mírná koncentrace změny intenzity magnetického pole oběma sondami, která je označena jako SCZ 1. U vzorku H nebyla změřena SCZ v místě oslabení předpínací výztuže, ale pouze uprostřed měření.



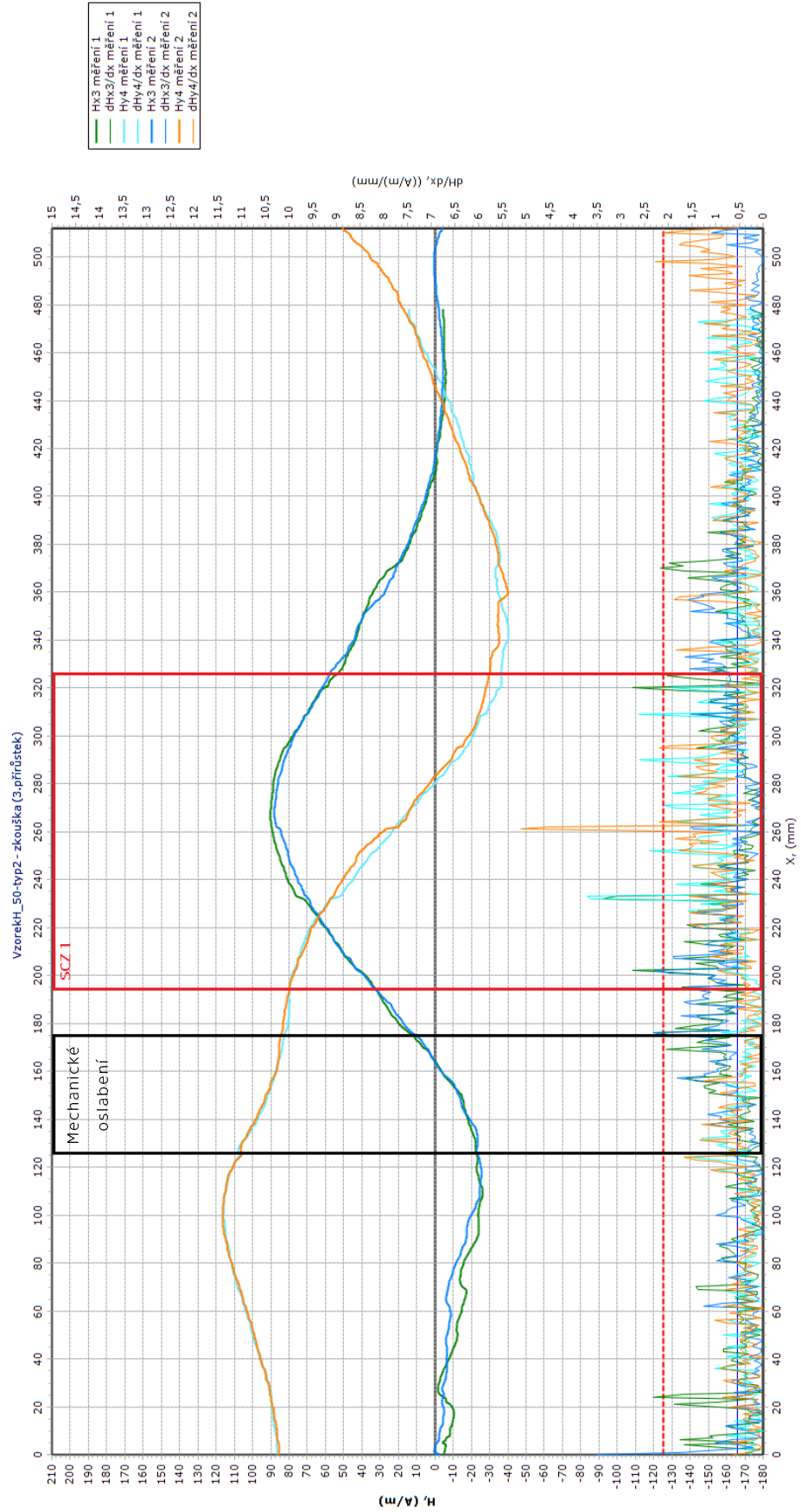
Obr. 104 Výsledky měření-vzorek H



Obr. 105 Výsledky měření-vzorek H



Obř. 106 Výsledky měřeni-vzorek H



Obr. 107 Výsledky měření- vzorek H



6.2.9 Vyhodnocení výsledků experimentu

Navržený experiment nepřinesl očekávané výsledky. V místech mechanického oslabení se nepodařilo naměřit průkazné hodnoty magnetické odezvy, podle kterých by bylo možné identifikovat oslabené předpínací lano. Na výsledných grafech je pozorován vývoj intenzity magnetického pole, který při důkladné analýze přinesl dílčí, ale významné, poznatky. Na těchto poznatcích se může pokračovat v následující výzkumné činnosti.

Prvním poznatkem je značný vliv krycí vrstvy betonu. Tloušťka betonové vrstvy výrazně snižuje účinnost měřícího přístroje, jak je patrné z výsledků u vzorku A. Proto jsou zde uvedeny pouze výsledky s nižší průkaznější tloušťkou krycí vrstvy.

Kousky kovové výztuže ve vzorcích (A, C, E, G) mohou výrazně ovlivnit svojí přítomností měření. Krajiní sondy zaznamenaly přiblížení ke kovové výztuži nárůstem intenzity magnetického pole. Konstrukce s velkým množstvím konstrukční výztuže nebude možné správně diagnostikovat. Ve výsledcích jsem zaznamenal, že vzorky bez kovové výztuže mají do zatěžovací zkoušky konstantní průběh intenzity magnetického pole. U vzorků s kovovou výztuží mají grafy nepravidelný sinusový tvar. Následně při ohybové zkoušce se u všech vzorků začne vytvářet pro hodnoty ve směru y křivka připomínající arkus kotangens. Pro hodnoty ve směru x se vytvoří půl vlna sinusu. Při sledování změny intenzity magnetického pole nebyly zpozorovány žádné významné podobnosti. Tento poznatek znamená, že metoda MMM by se měla vždy doplnit další metodou na bázi radaru, která detekuje předpínací a betonářskou výztuž a umožní rozlišení výsledků.

V experimentu se u žádného vzorku nepodařilo naměřit a lokalizovat SCZ v místě mechanického opracování, ačkoliv koncentrovalo daleko větší napětí než neoslabená předpínací výztuž. Přesto se u vzorků objevují i místa označená jako SCZ, která se projevila převážně uprostřed. Mohlo by se jednat například o opření výztuže o kanálek, které způsobilo omačkání předpínací výztuže nebo samotné poškození kanálku. Místa označená fialovým obdélníkem představují vliv přidané kovové výztuže nebo drobné nepřesnosti při měření.

Po provedení celého experimentu bylo zahájeno zpětné analyzování celého problému. Výsledná analýza dospěla ke dvěma možným problémům. Prvním problémem byla nedostatečná simulace korozního chování. Zatímco koroze rozrušuje povrch materiálu v dlouhém časovém horizontu, při kterém vznikají trhliny a nerovnosti povrchu, u mechanického opracování byl materiál pouze plynule vybroušen. Pro potvrzení této hypotézy bylo provedeno



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Možnosti detekce poškození předpínací výztuže metodou MMM

dodatečné měření v terénu na mostních objektech. Druhý možný problém může být citlivost snímačů. V dnešní době existují sondy s vyšší citlivostí, které dokáží skenovat kovové potrubí zakopané v zemi (3-4 m tloušťka).

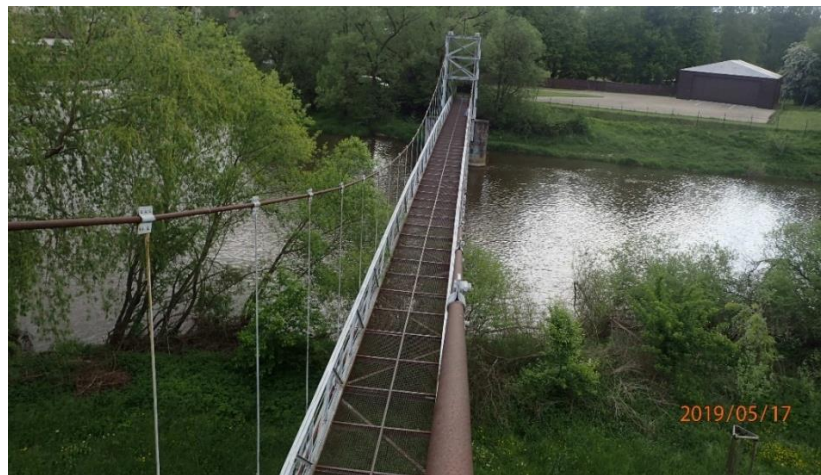
Vliv materiálu chráničky nebyl v experimentu prokázán. Pro zjištění tohoto vlivu bude potřeba provést další experimentální měření.



6.3 Měření na mostních objektech

6.3.1 Lávka přes řeku Sázavu

Lávka přes řeku Sázavu se řadí mezi visuté konstrukce. Nosná konstrukce je tvořena dvěma nosnými lany, která jsou zakotvena na krajích mostů do kotevních bloků. Mostovka je zavěšena svislými závěsy na nosném laně. Během diagnostického průzkumu byla měřena magnetická odezva na hlavních nosných lanech u kotevního bloku.



Obr. 108 Lávka přes řeku Sázavu (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.)

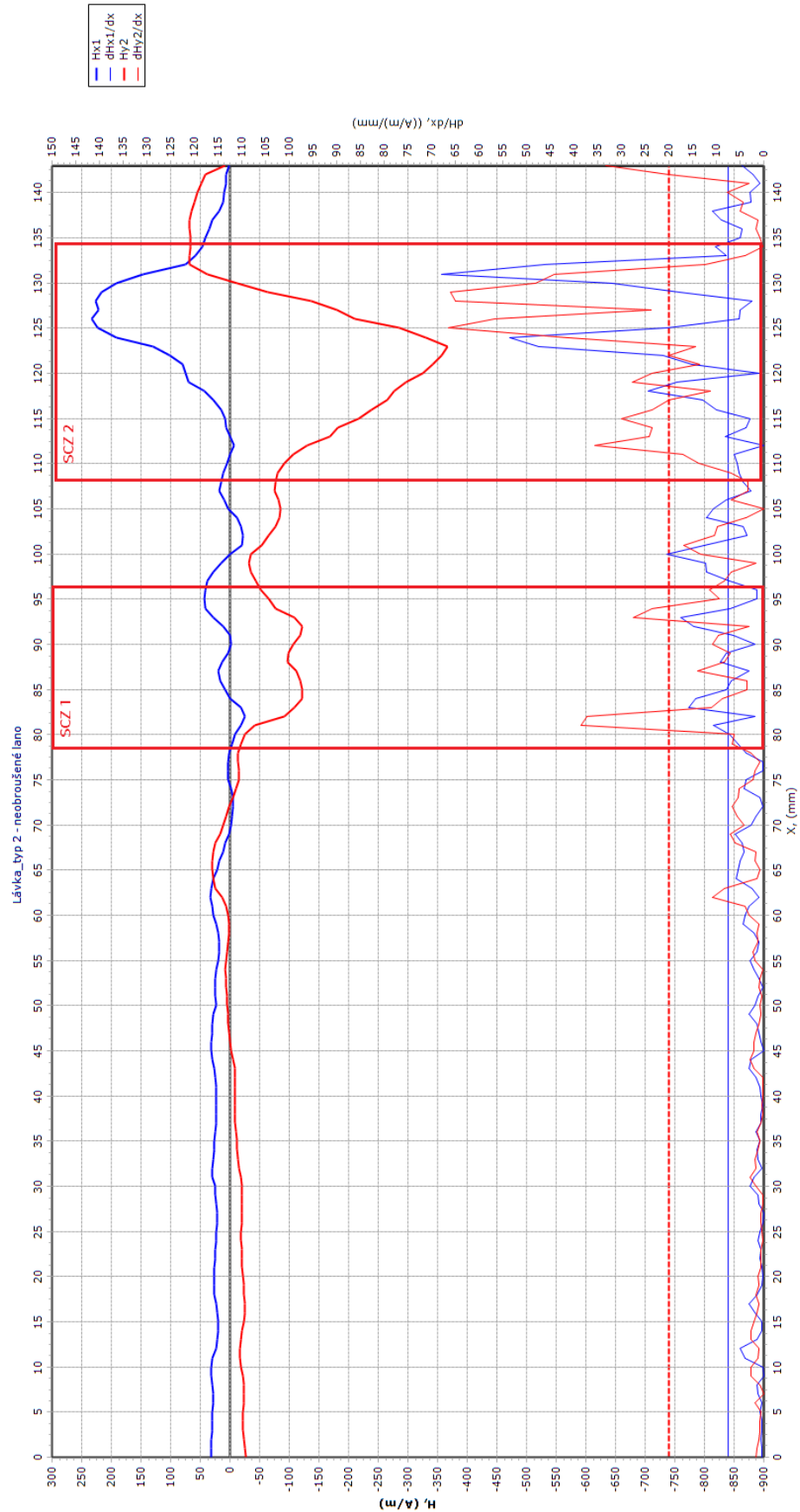
Z naměřených výsledků bylo vybráno měření korozně napadeného nosného lana u kotevního bloku. K měření byla použita sonda typ 2. Skenování drátu bylo provedeno pojížděním po povrchu ve směru vinutí drátu ke koroznímu poškození. Nosné lano bylo naměřeno v původním stavu a následně po obroušení korozních zplodin. Výsledné grafy ukazují výrazné snížení magnetické odezvy v SCZ po obroušení korozního oslabení. Tím se potvrdil předpoklad, že mechanické opracování nemá tak velký vliv jako působící koroze.



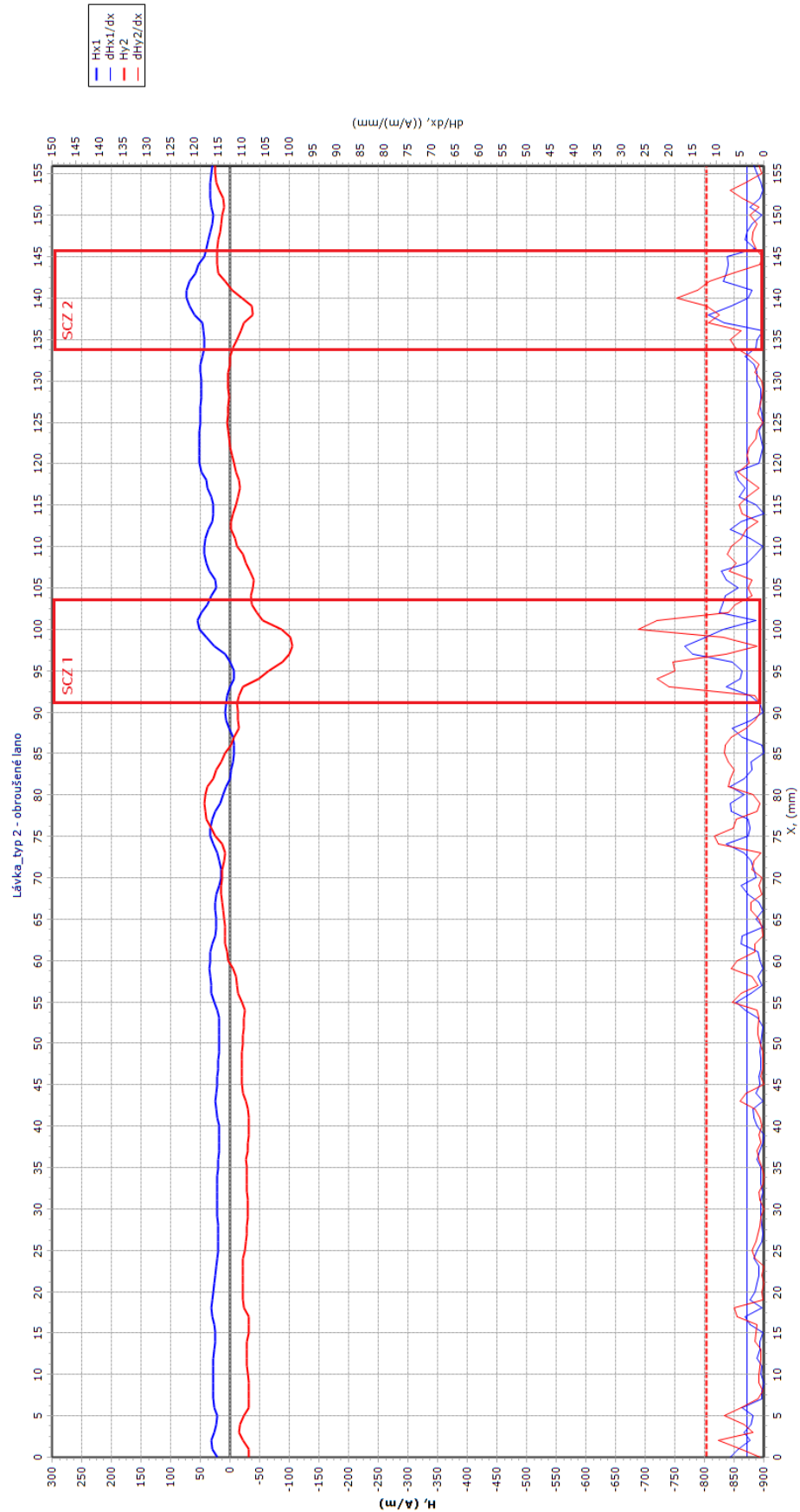
Obr. 110 Neobroušené lano (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.)



Obr. 109 Obroušené lano (foto doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.)



Obr. 111 Výsledky měření lávka přes Sázavu



Obr. 112 Výsledky měření-lávka přes Sázavu



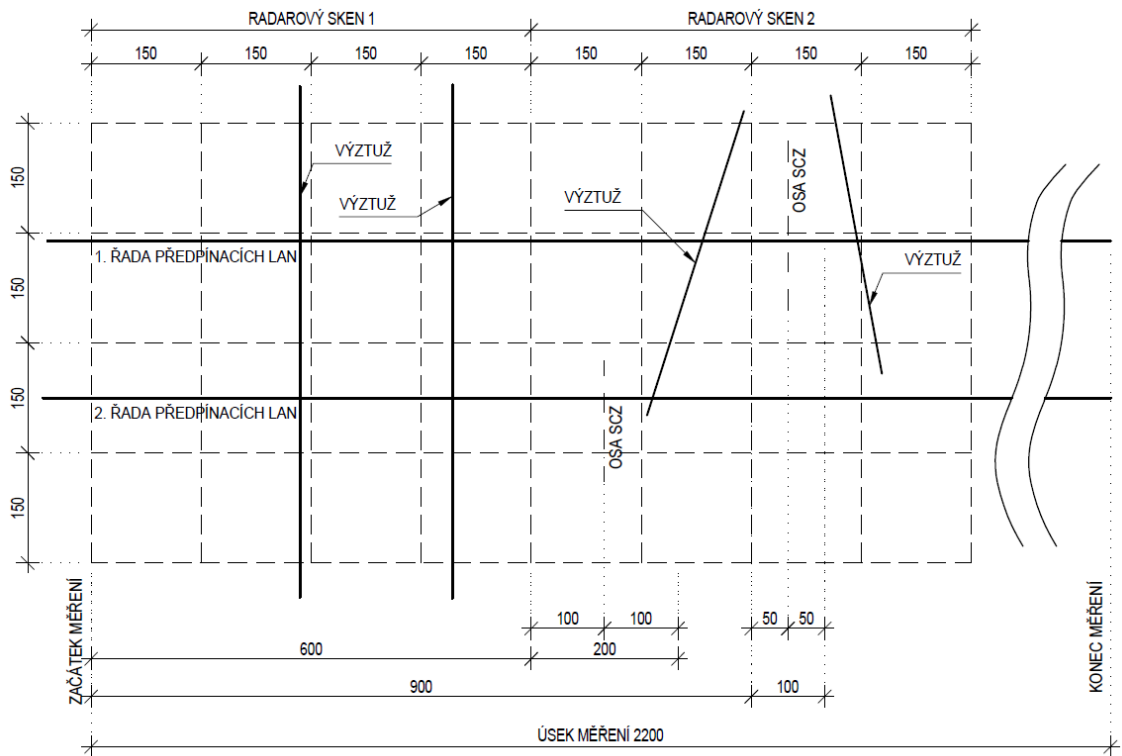
6.3.2 Lávka v Radonicích

Nosná konstrukce lávky je tvořena z předpjatého betonového pásu. Pás tvoří betonové segmenty, které spíná předpínací výztuž. V současné době je tato lávka zavřená z důvodu podezření na špatný stav předpínací výztuže.

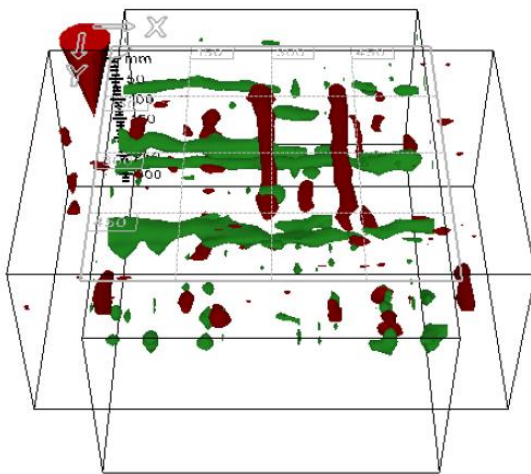


Obr. 113 Lávka v Radonicích (foto: Tomáš Dejmek)

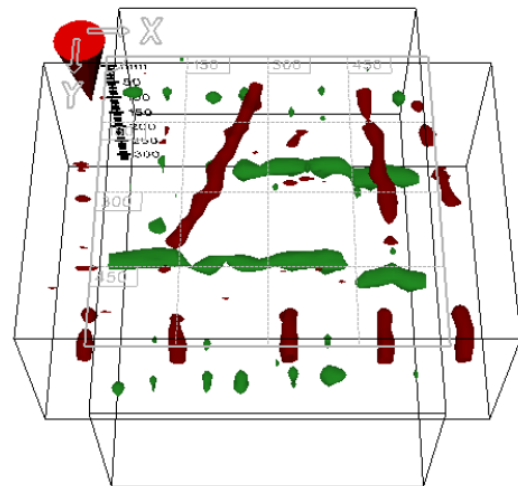
Při zběžné vizuální prohlídce bylo patrné, že do nosné konstrukce zatéká voda (výluhy na dolní straně segmentů). Pro měření bylo vybráno potencionální místo s poškozenou předpínací výztuží, které se nacházelo na 8. segmentu vlevo směrem od vesnice. Před měřením byl provedený radarový sken k lokalizaci předpínací výztuže a ostatní kovové výztuže. Na asfaltový povrch mostovky bylo rozkresleno schéma výztuže. Měření bylo provedeno v ose předpínací výztuže. Jsou zde uvedeny výsledky měření 1. a 2. řady předpínací výztuže.



Obr. 114 Schéma měření lávka Radonice



Obr. 115 Radarový sken 1 lávka Radonice



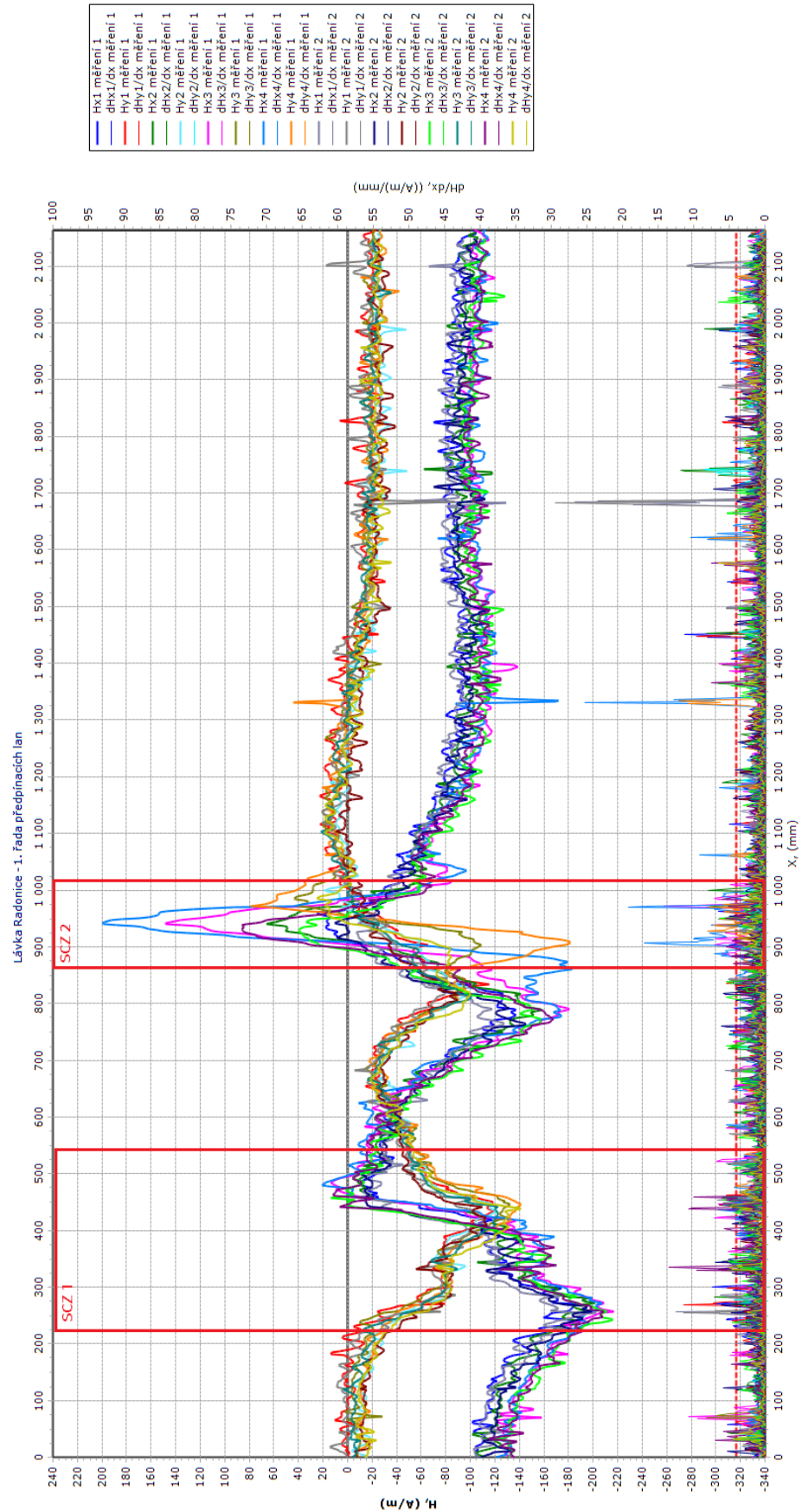
Obr. 116 Radarový sken 2 lávka Radonice



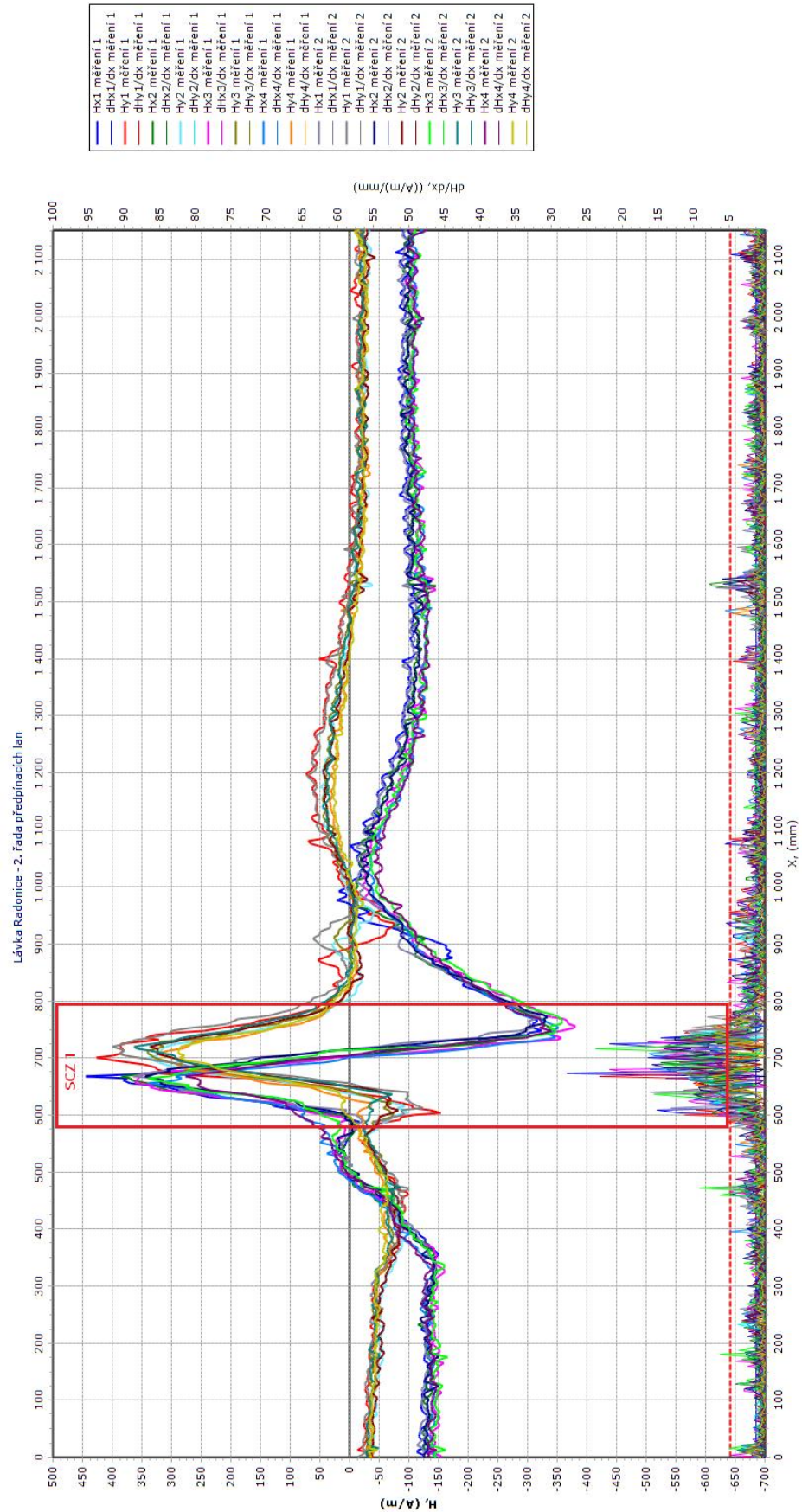
V grafu 1. řady předpínacích lan byly zaznamenány 2 místa SCZ. První místo (SCZ 1) odpovídá poloze zjištěné konstrukční výztuže. Druhé místo (SCZ 2) nacházející se 900 mm od počátku měření, by mohlo být korozním poškozením předpínacího lana. V tomto místě je dle radarového skenu pouze předpínací výztuž. Graf 2. řady předpínací výztuže vykazuje výraznou špičku změny intenzity magnetického pole 600 mm od začátku měření. Také zde se nachází pouze předpínací výztuž a mohlo by se jednat o místo korozního poškození předpínacího lana. V současné době probíhá jednání se správcem mostního objektu o provedení vrtaných sond, které ověří nebo vyvrátí naše předpoklady o korozním poškození předpínací výztuže.



Obr. 117 Měření na lávce v Radonicích (foto: Tomáš Dejmek)



Obr. 118 Výsledky měření lávka Radonice



Obr. 119 Výsledky měření-lávka Radonice



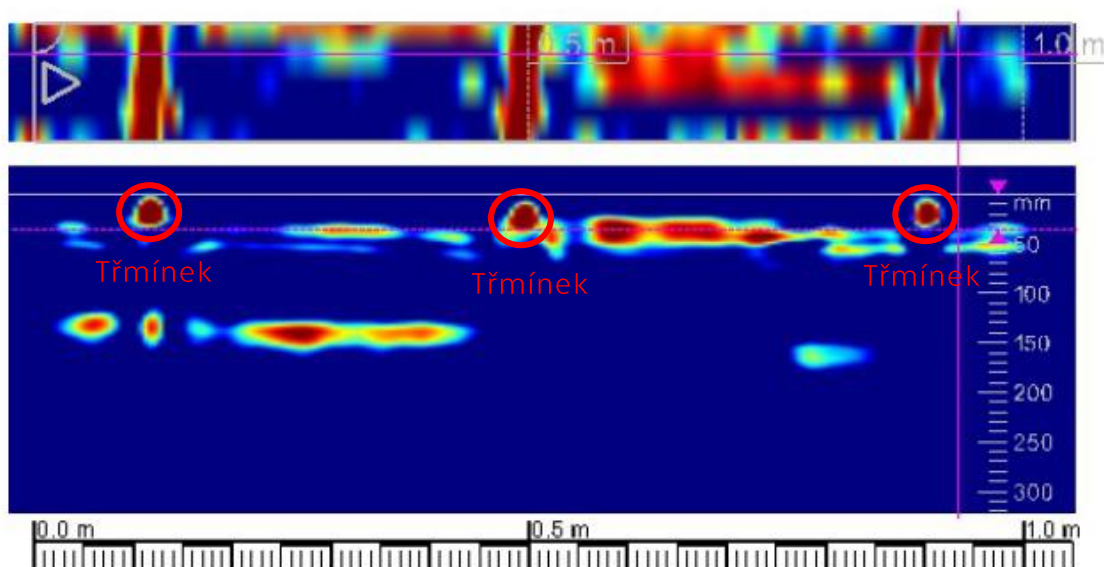
6.3.3 Most ev.č. B-081 (Mírového hnutí - Benkova)

Hlavní nosná konstrukce mostu je tvořena ze 14 předpjatých nosníků KA-67 dl. 12 m uložených v osové vzdálenosti 1,05 m. Nosníky KA-67 jsou dodatečně předpjaté. Nosníky mají ocelové chráničky, ve kterých je zainjektovaná předpínací výztuž.

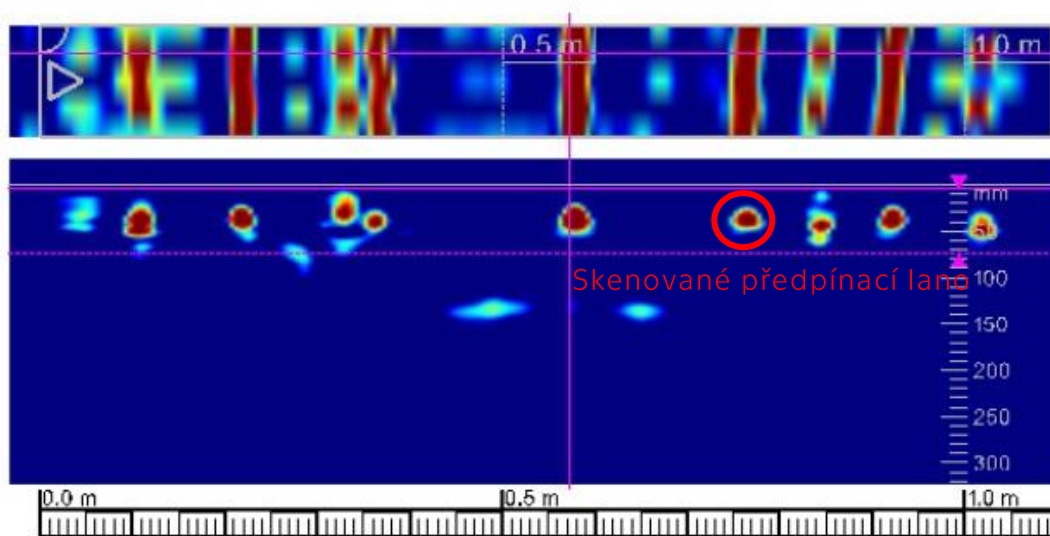


Obr. 120 Most ev.č. B-081 (foto: Tomáš Dejmek)

Dle hlavní prohlídky zatéká do nosné konstrukce voda a existuje riziko koroze předpínací výztuže. Pro měření byl vybrán nosník s vizuálními výluhy korozních zplodin. Na vybraném úseku se nejprve provedl radarový sken pro zjištění polohy předpínací a konstrukční výztuže. V podélném směru byla zjištěna očekávaná přítomnost konstrukční výztuže. Vzdálenost příčné výztuže odpovídala hodnotě ze statického výpočtu 400 mm. Příčný sken lokalizoval polohu předpínací výztuže.



Obr. 121 Podélný radarový sken nosníku KA-67



Obr. 122 Příčný radarový sken nosníku KA-67



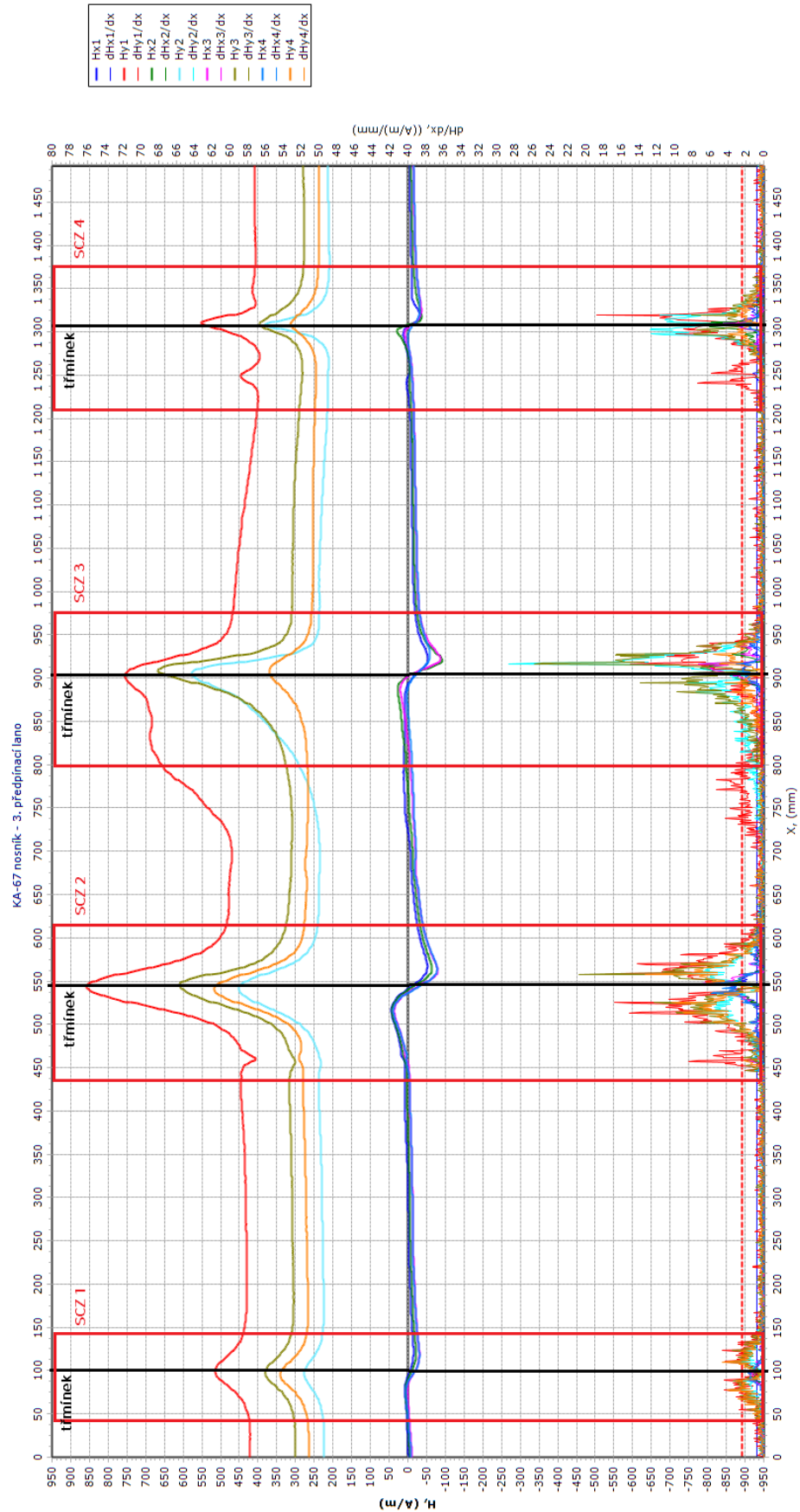
Obr. 123 Navrtaný kanálek předpínací výztuže (foto: Tomáš Dejmek)



Obr. 124 Výluhy v místě předpínací výztuže (foto: Tomáš Dejmek)

Na nosníku byla vyznačena poloha předpínací a konstrukční výztuže. Měření bylo zahájeno 100 mm před jedním z třmínků a bylo ukončeno po 1500 mm. Z naměřených výsledků je zde uvedeno měření předpínacího lana s vizuálními výluhy železa, které naznačovaly přítomnost koroze předpínacích lan. Magnetická odezva zaznamenala celkem 4 SCZ, avšak jejich poloha odpovídá poloze konstrukčních třmínků. Následně se ověřil stav předpínací výztuže navrtáním předpínacího kanálku. Předpínací lano bylo zainjektované a nevykazovalo známky koroze.

Měření na tomto mostě neprokázalo možnost detekce koroze předpínacích lan u KA prefabrikovaných nosníků. Pro potvrzení je potřeba provést měření na mostní konstrukci se zkorodovanými lany. Pro tento typ prefabrikovaných nosníků by metoda MMM mohla teoreticky fungovat. Jejich konstrukční výztuž je od sebe poměrně vzdálená a k ovlivnění výsledku by nemuselo docházet.



Obr. 125 Výsledky měření nosník KA-67



7 Závěr

Cílem této práce bylo ověřit novou nedestruktivní diagnostickou metodu předpínací výztuže v předpjatém betonu založenou na magnetické paměti materiálu. Jednalo se o první použití této metody pro diagnostiku poškozené výztuže, a proto byl navržen experiment s různými kombinacemi vlivů, který měl poskytnout široké spektrum informací.

Výsledky experimentu nepotvrdily předpoklad lokalizace poškození předpínací výztuže, avšak přinesly velmi cenné poznatky pro další výzkumnou činnost. Návrh celého experimentu byl důkladně analyzován a byly vyvozeny možné poznatky z detekovaných SCZ a nemožnost detekce v místě poškození. První možnou příčinou mohla být citlivost měřících senzorů. Vyzkoušení citlivějších senzorů se ponechalo jako poslední možné řešení.

Velmi diskutovaným problémem bylo mechanické opracování předpínací výztuže, které simulovalo korozi. V souvislosti se získanými výsledky měření se ukázalo, že mechanické opracování materiálu nedokáže dostatečně simulovat korozi. V závěru práce byly dodatečně provedeny měření na mostních konstrukcích, u kterých byla pravděpodobnost výskytu koroze předpínací výztuže. Zajímavé výsledky přineslo měření na lávce v Radonicích, kde se aktuálně jedná o provedení vrtaných sond pro potvrzení naměřených výsledků.

Vývoj zcela nové diagnostické metody pro předpjaté konstrukce se svým rozsahem vymyká z časového plánu bakalářské práce, avšak prvotní experiment ukázal možné cesty kudy dále postupovat. Vývoj této diagnostické metody bude pokračovat i přes první neúspěch při experimentu. Do budoucna jsou naplánována další měření na mostních objektech, kterými se pokusíme prokázat použitelnost a rozsah použití metody MMM pro diagnostiku betonových předpjatých konstrukcí. Vývojem této metody bych se rád zabýval i v navazující diplomové práci.



8 Seznam obrázků

Obr. 1 Rozložení napětí v mimostředně předpjatém průřezu zatíženým spojitým zatížením [3].....	7
Obr. 2 Předpínací tyč [16]	9
Obr. 3 Předpínací lano (foto: Martin Jonáš)	10
Obr. 4 Předem předpjaté mostní nosníky [23].....	11
Obr. 5 Výroba předem předpjatého nosníku [24]	11
Obr. 6 Schéma technologie vícelanového předpínacího systému [3]	12
Obr. 7 Kotevní oblast [25].....	12
Obr. 8 Připravené chráničky pro předpínací výztuž [26]	12
Obr. 9 Schéma technologie předpínacího systému s vnější volnou výztuží [20]	13
Obr. 10 Komorový nosník s vnější volnou předpínací výztuží [27].....	13
Obr. 11 Vznik elektrochemické koroze na povrchu oceli [19].....	14
Obr. 12 Rovnoměrná koroze předpínacího lana (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.)	16
Obr. 13 Princip vzniku bodové koroze [18].....	16
Obr. 14 Bodová koroze předpínacího lana [28]	16
Obr. 15 Štěrbínová koroze [21]	17
Obr. 16 Bodová a štěrbinová koroze [21].....	17
Obr. 17 Vznik korozního praskání [17]	17
Obr. 18 Princip měření akustikou emisí [11].....	20
Obr. 19 Princip GPR [11].....	21
Obr. 20 Magnetické siločáry v místě defektu [22]	22
Obr. 21 Schéma SMFL distribuce v zóně koncentrace napětí [12].....	23
Obr. 22 Pracovní diagram oceli kombinovaný s grafem vývoje intenzity magnetického pole [15].....	23
Obr. 23 3D model neoslabeného lana.....	24
Obr. 24 Detail neoslabeného lana	24
Obr. 25 3D model oslabení 1 mm.....	25
Obr. 26 Detail oslabení 1 mm.....	25
Obr. 27 3D model oslabení 2 mm.....	25
Obr. 28 Detail oslabení 2 mm	26
Obr. 29 3D model oslabení 3 mm	26
Obr. 30 Detail oslabení 3 mm.....	26
Obr. 31 Uvažovaný pracovní diagram	27
Obr. 32 Kontakt mezi dvěma dráty	28
Obr. 33 Nastavené okrajové podmínky.....	28
Obr. 34 Rozložené napětí u neoslabeného lana při $\epsilon=8,333E-03$	31
Obr. 35 Plastická deformace u neoslabeného lana při $\epsilon=8,333E-03$	31
Obr. 36 Oslabení 1 mm-rozložení napětí při $\epsilon=8,333E-03$	33
Obr. 37 Oslabení 1 mm-plastická deformace při $\epsilon=8,333E-03$	33



Obr. 38 Oslabení 2 mm-rozložení napětí při $\epsilon=7,333E-03$	35
Obr. 39 Oslabení 2 mm-plastická deformace při $\epsilon=7,333E-03$	35
Obr. 40 Oslabení 3 mm-rozložení napětí při $\epsilon=4,667E-03$	37
Obr. 41 Oslabení 3 mm-plastická deformace při $\epsilon=4,667E-03$	37
Obr. 42 Plastická deformace	38
Obr. 43 Mezní elastické napětí.....	38
Obr. 44 Průběh koeficientu K.....	41
Obr. 45 Koeficient K pro pružné chování.....	41
Obr. 46 Navržená geometrie vzorků.....	44
Obr. 47 Vnitřní síly.....	45
Obr. 48 Rozdělení sil na průřezu	46
Obr. 49 Krajní kovový armokoš (foto: Tomáš Dejmek).....	50
Obr. 50 Detail přidané kovové výztuže (foto: Martin Jonáš).....	50
Obr. 51 Dokončené armokoše s chráničkami v bednění (foto: Martin Jonáš)...	51
Obr. 52 Vibrování betonové směsi (foto: Martin Jonáš)	52
Obr. 53 Dokončená betonáž vzorků (foto: Martin Jonáš).....	52
Obr. 54 Opracovaná předpínací vyztuž (foto: Tomáš Dejmek).....	53
Obr. 55 Schéma umístění předpínacích lan ve vzorcích.....	54
Obr. 56 Tenzometr B1 (foto: Tomáš Dejmek).....	54
Obr. 57 Výsledky tlakové zkoušky betonu.....	55
Obr. 58 Předepnutí vzorků s poškozením 1 mm.....	56
Obr. 59 Předepnutí vzorků s poškozením 2 mm	56
Obr. 60 Injektáž vybraných vzorků (foto: Tomáš Dejmek)	57
Obr. 61 Detail zakotveného lana (foto: Tomáš Dejmek)	57
Obr. 62 Schéma čtyřbodového ohybu.....	58
Obr. 63 Porušený vzorek A (foto: Tomáš Dejmek).....	58
Obr. 64 Příjímací zařízení TSC-7M-16 (foto: Tomáš Dejmek).....	59
Obr. 66 Skenovací zařízení typ 2 (foto: Tomáš Dejmek).....	59
Obr. 65 Skenovací zařízení typ 1 - vozíček (foto: Tomáš Dejmek)	59
Obr. 67 Schéma skenovacích zařízení.....	60
Obr. 68 Poškozené předpínací lano (foto: Tomáš Dejmek).....	61
Obr. 69 Schéma měření samostatní předpínací výztuž.....	61
Obr. 70 Výsledky měření-samostatné předpínací lano.....	62
Obr. 71 Výsledky měření-poškozené předpínací lano.....	63
Obr. 72 Schéma měření předpjeté vzorky.....	64
Obr. 73 Výsledky měření-vzorek A.....	67
Obr. 74 Výsledky měření-vzorek A.....	68
Obr. 75 Výsledky měření-vzorek A.....	69
Obr. 76 Výsledky měření-vzorek A	70
Obr. 77 Výsledky měření-vzorek A.....	71
Obr. 78 Výsledky měření-vzorek A	72
Obr. 79 Výsledky měření-vzorek A	73
Obr. 80 Výsledky měření-vzorek A.....	74



Obr. 81 Výsledky měření-vzorek B.....	76
Obr. 82 Výsledky měření-vzorek B.....	77
Obr. 83 Výsledky měření-vzorek B.....	78
Obr. 84 Výsledky měření-vzorek B.....	79
Obr. 85 Výsledky měření-vzorek B.....	80
Obr. 86 Výsledky měření-vzorek C.....	82
Obr. 87 Výsledky měření-vzorek C.....	83
Obr. 88 Výsledky měření-vzorek C.....	84
Obr. 89 Výsledky měření-vzorek C.....	85
Obr. 90 Výsledky měření-vzorek D.....	87
Obr. 91 Výsledky měření-vzorek D.....	88
Obr. 92 Výsledky měření-vzorek E.....	90
Obr. 93 Výsledky měření-vzorek E.....	91
Obr. 94 Výsledky měření-vzorek E.....	92
Obr. 95 Výsledky měření-vzorek E.....	93
Obr. 96 Výsledky měření-vzorek E.....	94
Obr. 97 Výsledky měření-vzorek F.....	96
Obr. 98 Výsledky měření-vzorek F.....	97
Obr. 99 Výsledky měření-vzorek F.....	98
Obr. 100 Výsledky měření-vzorek F.....	99
Obr. 101 Výsledky měření-vzorek G.....	101
Obr. 102 Výsledky měření-vzorek G.....	102
Obr. 103 Výsledky měření-vzorek G.....	103
Obr. 104 Výsledky měření-vzorek H.....	105
Obr. 105 Výsledky měření-vzorek H.....	106
Obr. 106 Výsledky měření-vzorek H.....	107
Obr. 107 Výsledky měření-vzorek H.....	108
Obr. 108 Lávka přes řeku Sázavu (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.).....	111
Obr. 110 Obroušené lano (foto doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.).....	111
Obr. 109 Neobroušené lano (foto: doc. Ing. Pavel Ryjáček PhD.).....	111
Obr. 111 Výsledky měření-lávka přes Sázavu.....	112
Obr. 112 Výsledky měření-lávka přes Sázavu.....	113
Obr. 113 Lávka v Radonicích (foto: Tomáš Dejmek).....	114
Obr. 114 Schéma měření lávka Radonice.....	115
Obr. 115 Radarový sken 1 lávka Radonice.....	115
Obr. 116 Radarový sken 2 lávka Radonice.....	115
Obr. 117 Měření na lávce v Radonicích (foto: Tomáš Dejmek).....	116
Obr. 118 Výsledky měření-lávka Radonice.....	117
Obr. 119 Výsledky měření-lávka Radonice.....	118
Obr. 120 Most ev.č. B-081 (foto: Tomáš Dejmek).....	119
Obr. 121 Podélný radarový sken nosníku KA-67.....	120
Obr. 122 Příčný radarový sken nosníku KA-67.....	120
Obr. 123 Navrtaný kanálek předpínací výztuže (foto: Tomáš Dejmek).....	121



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Možnosti detekce poškození předpínací výztuže metodou MMM

Obr. 124 Výluhy v místě předpínací výztuže (foto: Tomáš Dejmek).....	121
Obr. 125 Výsledky měření-nosník KA-67.....	122



9 Seznam tabulek

Tab. 1 Výsledky neoslabeného lana	30
Tab. 2 Výsledky oslabení 1 mm	32
Tab. 3 Výsledky oslabení 2 mm.....	34
Tab. 4 Výsledky oslabení 3 mm.....	36
Tab. 5 Koeficient K-oslabení 1 mm	39
Tab. 6 Koeficient K-oslabení 2 mm	40
Tab. 7 Koeficient K-oslabení 3 mm.....	40
Tab. 8 Materiálové charakteristiky	44
Tab. 9 Složení betonové směsi	51
Tab. 10 Označení tenzometrů.....	54
Tab. 11 Srovnání numerických modelů s naměřenými hodnotami.....	57
Tab. 12 Postup měření vzorek A	66
Tab. 13 Postup měření vzorek B	75
Tab. 14 Postup měření vzorek C	81
Tab. 15 Postup měření vzorek D	86
Tab. 16 Postup měření vzorek E	89
Tab. 17 Postup měření vzorek F.....	95
Tab. 18 Postup měření vzorek G.....	100
Tab. 19 Postup měření vzorek H	104



10 Použité normy a literatura

- [1] VÍTEK, Jan. *Historie předpjatého betonu*. Praha: ČKAIT, 2016. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87438-84-8.
- [2] BAŽANT, Boris. *Předpínací výztuž a její využití*. Praha: SNTL, 1978.
- [3] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2649-7.
- [4] VÁCHA, Jaroslav. *Předpjatý beton pro mostní stavby: určeno pro posl. fak. stavební*. 3. vyd. Brno: VUT, 1984. Učební texty vysokých škol.
- [5] BAŽANT, Boris. *Koroze ocelové výztuže v železovém a předpjatém betonu*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1989. Knižnice technických aktualit.
- [6] BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozní ochrana kovů*. Praha: Academia, 1966.
- [7] ČERNÝ, Miroslav. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [8] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>
- [9] ČSN 73 6221 *Prohlídky mostů pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [10] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, *S 5 Správa mostních objektů*. Praha: České dráhy, 1996.
- [11] KASHIF UR REHMAN, Sardar, Zainah IBRAHIM, Shazim Ali MEMON a Mohammed JAMEEL. *Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **107**, 58-86 [cit. 2019-04-30]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815306905>
- [12] BAO, Sheng, Meili FU, Shengnan HU, Yibin GU a Huangjie LOU. *A Review of the Metal Magnetic Memory Technique*. In: *Volume 4: Materials Technology* [online]. ASME, 2016, 2016-6-19, V004T03A006- [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1115/OMAE2016-54269. ISBN 978-0-7918-4995-8. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/OMAE2016-54269>
- [13] VENKATACHALAPATHI, N., S.MD. JAMEEL BASHA, G. JANARDHAN RAJU a P. RAGHAVULU. *Characterization of Fatigued Steel States with Metal Magnetic Memory Method*. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2018, **5(2)**, 8645-8654 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.04.002. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221478531830659X>



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Možnosti detekce poškození předpínací výztuže metodou MMM

- [14] ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2). *Navrhování betonových konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 11/2006
- [15] DUBOV, Anatoly. Purpose and practical capabilities of the metal magnetic memory method. *Energoagnostika* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.energoagnostika.com/article-purpose-and-practical-capabilities.html>



11 Zdroje obrázků

- [16] Macalloy 1030 and S1030 Post Tensioning Bar. In: *Macalloy* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.macalloy.com/products-and-services/macalloy-1030-and-s1030-post-tensioning-bar>
- [17] Korozní praskání. In: *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Korozn%C3%AD%20prask%C3%A1n%C3%AD.pdf?redirected>
- [18] Bodová koroze. In: *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Bodov%C3%A1%20koroze.pdf?redirected>
- [19] Koroze kovů. In: *ELUC* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2286>
- [20] Dodatečné předpínání. In: *VSL* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.vsl.cz/dodatecne-predpinani/>
- [21] WANG, Lei, Lizhao DAI, Xuhui ZHANG a Jianren ZHANG. Concrete Cracking Prediction Including the Filling Proportion of Strand Corrosion Products. *Materials* [online]. 2017, 10(1) [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.3390/ma10010006. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/1/6>
- [22] WILSON, John W., Gui Yun TIAN a Simon BARRANS. Residual magnetic field sensing for stress measurement. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2007, 135(2), 381-387 [cit. 2019-05-03]. DOI: 10.1016/j.sna.2006.08.010. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424706005346>
- [23] 136-foot super-girder used on bridge project. In: *Concreteconstruction* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.concreteconstruction.net/precast-block-production/136-foot-super-girder-used-on-bridge-project_o
- [24] Prestressed Concrete Beam Mould. In: *Wingking* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.wingking.com/projects.html>
- [25] Předpínací systémy na mostním objektu 205. In: *Asb-portal* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/predpinaci-systemy-na-mostnim-objektu-205>
- [26] Poznatky z instalace předpětí do různých typů nosných konstrukcí mostů na D1 Hubová–Ivachnová. In: *Asb-portal* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/poznatky-z-instalace-predpeti-do-ruznych-typu-nosnych-konstrukci-mostu-na-d1-hubovaivachnova>



- [27] DYWIDAG External Tendons. In: *Structurae* [online]. [cit. 2019-05-04].
Dostupné z: <https://structurae.net/products-services/dywidag-external-tendons>
- [28] LI, Fumin, Yingshu YUAN a Chun-Qing LI. Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, 25(10), 3878-3885 [cit. 2019-05-22]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.011. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811001516>