

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Vladimír Štěpánek

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

**DISTRIBUCE TOXICKÝCH KOVŮ Z UHELNÝCH ELEKTRÁREN, KONTINUÁLNÍ
MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ ROZPTYLU EMISÍ V CZ-PL OBLASTI**

Diplomová práce

Autor: Bc. Vladimír Štěpánek
Studijní program: 1701T053 Fyzikální měření a modelování
Vedoucí práce: Ing. Lidmila Hyšplerová, CSc.
Odborní konzultanti: Doc. RNDr. Jan Kříž, PhD.
Ing. Radomír Srněnský
Dr hab. Zbigniew Ziembik, prof. UO
Oponent: Prof. ing. Antonín Lyčka, DrSc.

Hradec Králové

2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval pod vedením vedoucí práce samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne.....

.....

Bc. Vladimír Štěpánek

Poděkování:

Děkuji paní ing. L. Hyšplerové, CSc. za obětavé vedení mé diplomové práce, konzultantům doc. J. Křížovi, PhD. a panu ing. S. Honsovi za cenné informace. Můj dík patří také panu Ing. R. Srněnskému, z fy Idea-Envi za řadu konzultací při tvorbě emisních map a paní prof. A. Dołhańczuk-Śródke a panu prof. Z. Ziembikovi z katedry Biotechnologie Přírodovědno-technické fakulty Univerzity Opole za to, že se mi věnovali v průběhu mých opakovaných odborných stáží a pobytů. Mgr. J. Loskotovi děkuji za spolupráci při přípravě společných publikací.

Anotace

ŠTĚPÁNEK Vladimír: Distribuce toxických kovů z uhelných elektráren, kontinuální měření a modelování rozptylu emisí v CZ-PL oblasti.

Hradec Králové: Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2018.

Diplomová práce, 118 s.

V teoretické části práce jsou shrnuty současné poznatky o procesu vysokoteplotního spalování uhlí, technologiích snižujících emise a fyzikálních principech kontinuálních měření emisí v uhelných elektrárnách, včetně matematických vztahů pro modelování jejich rozptylu a sledování emisí těžkých kovů pomocí biomonitoringu. V praktické části jsou uvedeny výsledky kontinuálních měření emisí oxidů síry, oxidů dusíku a tuhých znečišťujících látek, jejich hmotnostní bilance a výsledky modelování rozptylu emisí vybraných těžkých kovů pomocí SYMOS'97, verze 2013 v referenčních bodech přeshraniční CZ-PL oblasti.

Klíčová slova: emise, tuhé znečišťující látky (TZL), moderní odlučovače spalin, kontinuální měření

Název diplomové práce v angličtině:

Annotation:

ŠTĚPÁNEK Vladimír: Distribution of toxic metals from coal-fired power plants, continuous measurement, modeling of dispersion of emissions at the CZ-PL region.

Hradec Králové: Faculty of Science, University of Hradec Králové, 2018. Diploma Thesis. 118s.

The theoretical part of the thesis summarizes the current knowledge of the process of high temperature combustion, emission reduction technologies and physical principles of continuous emission measurements in coal-fired power plants, including mathematical relations for modeling their dispersion and monitoring of heavy metal emissions through biomonitoring. In the practical part are presented the results of continuous measurements of sulfur oxides, oxides of nitrogen and solid pollutants, their mass balance and the results of modeling of dispersion of emissions of selected heavy metals using SYMOS'97, version 2013 at the cross-border CZ-PL reference points

Keywords: emissions, particulate matter (PM), modern flue gas dedusting, continuous measurements

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část.....	11
2.1	Produkty vysokoteplotního spalování uhlí.....	11
2.1.1	Distribuce těžkých kovů do frakcí vysokoteplotního spalování	15
2.2	Principy technologií snižující emise	17
2.2.1	Metody odsiřování spalin	17
2.2.2	Metody snižování oxidů dusíku ve spalinách	20
2.2.3	Metody snižování emisí tuhých znečišťujících látek.....	22
2.3	Fyzikální principy kontinuálních měření emisí.....	25
2.3.1	Kontinuální měření emisí oxidů síry a dusíku	25
2.3.2	Kontinuální měření emisí tuhých znečišťujících látek	26
2.4	Modelování emisí tuhých znečišťujících látek SYMOS'97 (verze2013) ...	27
2.5	Metody sledování emisí těžkých kovů pomocí biomonitoringu	35
3	Úkoly a cíle diplomové práce.....	37
4	Praktická část.....	38
4.1	Popis procesů čištění spalin	38
4.1.1	Procesy odsiřování spalin	38
4.1.2	Procesy odstraňování tuhých znečišťujících látek.....	41
4.1.2.1	Popis elektrostatických odlučovačů	41
4.1.2.2	Popis tkaninových filtrů	45
4.1.3	Procesy snížení NO _x metodou SNCR.....	47
4.2	Technika kontinuálních měření	51
4.2.1	Kontinuální měření emisí oxidů síry a dusíku	51
4.2.1.1	Kalibrační metody pro kontinuální měření emisí SO ₂ a NO _x	54
4.2.2	Kontinuální měření emisí tuhých znečišťujících látek	55
4.2.2.1	Kalibrační metoda pro měření emisí TZL.....	57
4.3	Experimentální výsledky	59
4.3.1	Rozbory paliva.....	59
4.3.2	Výsledky kontinuálních měření emisí oxidů dusíku	61
4.3.2.1	Výsledky kontinuálních měření NO _x bez sekundární denitrifikace	61

4.3.2.2	Výsledky kontinuálních měření NO _x se sekundární denitrifikací.....	63
4.3.2.3	Kalibrace kontinuálních měření NO _x	65
4.3.3	Výsledky kontinuálních měření emisí tuhých znečišťujících látek.....	68
4.3.3.1	Výsledky kontinuálních měření za tkaninovými filtry	68
4.3.3.2	Výsledky kontinuálních měření TZL za elektrostatickými odlučovači	70
4.3.3.3	Výsledky kontinuálních měření emisí TZL za odsiřovací linkou.....	72
4.3.3.4	Kalibrace kontinuálních měření TZL.....	74
4.3.4	Výsledky kontinuálních měření emisí oxidů síry	77
4.3.4.1	Výsledky kontinuálních měření SO ₂ za elektrostatickými odlučovači	77
4.3.4.2	Výsledky kontinuálních měření emisí SO ₂ za odsiřovací linkou.....	79
4.3.4.3	Kalibrace kontinuálních měření SO ₂	81
4.3.5	Monitorování, záznam a vyhodnocování emisních měření	83
4.3.6	Hmotnostní bilance emisí.....	89
4.4	Výsledky modelování rozptylu emisí pomocí SYMOS'97, verze 2013	94
4.4.1	Modelování emisí PM ₁₀ , elektrárna Chvaletice	94
4.4.2	Modelování emisí PM ₁₀ , elektrárna Opatovice.....	95
4.4.3	Modelování emisí PM _{2,5} , elektrárna Chvaletice.....	96
4.4.4	Modelování emisí PM _{2,5} , elektrárna Opatovice	97
4.4.5	Modelování emisí Hg, elektrárna Chvaletice	98
4.4.6	Modelování emisí Hg, elektrárna Opatovice	99
4.4.7	Modelování emisí těžkých kovů, elektrárna Chvaletice.....	100
4.4.8	Modelování emisí těžkých kovů, elektrárna Opatovice	100
5	Diskuze a závěry	101
6	Použitá literatura	104
7	Související publikační činnost autora	108
	Přílohy	110
I.	Seznam použitých zkratk a symbolů	110
II.	Seznam obrázků a grafů	115
III.	Seznam tabulek	117

1 Úvod

V současnosti ve všech vyspělých zemích světa a stejně tak i v Evropě sílí tlak na odstavování velkých uhelných elektráren a snaha o jejich náhradu obnovitelnými zdroji energie. Problémem však je, že všechny využívané obnovitelné zdroje vyžadují plnou náhradu pro případ nevhodných klimatických podmínek. Vzhledem k relativně rozsáhlým rezervám uhlí, v porovnání s ropou a zemním plynem, je zřejmé, že si uhlí i v budoucnu udrží důležitou pozici jakožto celosvětový zdroj energie. V České republice je 47 % elektrické energie zajišťováno uhelnými elektrárnami. Jejich náhrada alternativními zdroji je proto ekonomicky i technologicky v dohledné době nereálná.

Uhelné elektrárny přinášejí svým provozem mnoho negativních dopadů na životní prostředí. Jejich emise jsou obvykle rozdělovány do tří skupin. Do první skupiny jsou zařazovány oxidy síry, pevné částice, halogeny a těžké kovy, do druhé skupiny oxidy dusíku a oxid uhelnatý a do třetí oxid uhličitý, který je hlavním produktem dokonalého spálení uhlí. Zavedením moderních technologií se velmi podstatně podařilo snížit emise oxidů síry, oxidů dusíku i oxidu uhelnatého.

Jako těžké kovy je označována skupina prvků s hustotou vyšší než $4,5 \text{ g.cm}^{-3}$. V životním prostředí se toto označení vžilo pro celou širší skupinu polutantů, která by se však měla spíše označovat jako toxické kovové prvky. Při spalování uhlí dochází k distribuci přítomných těžkých kovů mezi ložový popel (škváru), úletový popílek, plynný aerosol a plynné emise, kdy jsou nakondenzovány a nasorbovány na povrch pevných částic. Z důvodu velkého měrného povrchu jsou jejich nejvyšší obsahy na těch nejmenších částicích, které jsou velmi obtížně odstranitelné pomocí odlučovacích zařízení. Frakce částic s aerodynamickým průměrem pod $2,5 \mu\text{m}$ tvoří nejstabilnější aerodispersní soustavy vyznačující se dlouhou dobu setrvání v atmosféře a schopných transportu na velké vzdálenosti. Tyto jemnozrné popílkové částice jsou po vdechnutí deponovány v různých oblastech lidského organismu v závislosti na aerodynamické velikosti těchto částic.

Za hlavní antropogenní anorganické polutanty jsou považovány silně toxické těžké kovy s kombinovaným účinkem olovo, kadmium, arsen a rtuť. Poškozují respirační systém, po usazení v plicích migrují do ostatních částí těla, kde mohou poškozovat další orgány, jsou kancerogenní a teratogenní.

Za zvláště nebezpečné jsou považovány jejich organokovové sloučeniny a prekurzory, protože velmi snadno reagují s organickými látkami. Jedná se hlavně o organortuťnaté a organoolovnaté sloučeniny a také chlorid rtuťnatý a olovnatý. Těžké kovy mohou způsobovat poruchy krvetvorby, poškozování nervového systému i závažné poruchy některých vnitřních orgánů. Těžké kovy se v lidském těle neodbourávají a naopak některé mají schopnost bioakumulace. Zejména rtuť je velmi silný neurotoxin, který se akumuluje v potravinových řetězcích.

Do lidského organismu se dostává zejména inhalacemi par rtuti, které mají poměrně dlouhý poločas pobytu v atmosféře, kde se vyskytuje jak v elementární, tak i v oxidované formě anebo je rovněž vázaná na velmi jemnozrnné částice v aerosolech.

V oblasti česko-polského pohraničí jsou na české straně dva významní přispěvatelé k imisím, elektrárna Opatovice (EOP) a elektrárna Chvaletice (7EC).

Mají výjimečné postavení pro svou polohu ležící v hustě zalidněné oblasti v okolí krajských měst Hradec Králové a Pardubice.

Elektrárna Opatovice je kogenerační uhelná elektrárna se svorkovým elektrickým výkonem 363 MW o výstupním napětí 10,5 kV transformovaným na 110 kV. Je v ní instalováno šest výrobních bloků, z toho tři pouze elektrárenské a tři slouží pro kombinovanou produkci elektrické energie a tepla. Odsíření kouřových plynů je v provozu od roku 1998. Volba polohy EOP mezi městy Hradec Králové a Pardubice byla záměrná pro plánované zásobování přilehlých aglomerací teplem. V současnosti elektrárna zásobuje teplem a teplou vodou více jak 55 000 domácností. Nynějším vlastníkem je Energetický a průmyslový holding, a.s.

Elektrárna Chvaletice je uhelná kogenerační elektrárna se svorkovým elektrickým výkonem 820 MW o napětí 15,75 kV transformovaným na 400 kV. V elektrárně jsou čtyři výrobní bloky s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla. Od roku 1998 je v provozu odsíření spalin. Elektrárna leží 20 km západním směrem od města Pardubic u řeky Labe. Současným vlastníkem je Sev.en EC a.s. patřící do skupiny Severní energetická a.s.

Obě elektrárny svými emisemi zasahují rekreačně využívanou přeshraniční česko-polskou oblast s několika národními parky. V minulosti emise z velkých uhelných elektráren představovaly pro tuto oblast mimořádně velkou ekologickou zátěž. Z těchto důvodů vedení obou firem přikládá vysokou důležitost využívání nejmodernějších technologií při odprašování, odsiřování a odstraňování oxidů dusíku ze spalin.

S tím souvisí i kontinuální monitoring emisí. Finančně velmi náročné měřicí přístroje kontinuálně monitorují obsah emisí ve spalinách.

Aby bylo možné zjistit výši příspěvku sledovaného zdroje k imisím v dané oblasti, jsou pravidelně prováděny výpočty rozptylu kouřových vleček obou těchto velkých zdrojů emisí. V České republice je od roku 1998 zaveden pro výpočty znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů SYMOS'97, Systém modelování znečišťujících zdrojů.

Od roku 2021 mají platit nové přísnější limity, pro jejichž dodržení jsou nutné nemalé investice. Je proto třeba lépe prozkoumat a objasnit problematiku jak fyzikálních principů metod regulujících úniky pevných emisí do atmosféry, tak i výpočtů emisních limitů a matematického modelování kouřových vleček obou zdrojů.

2 Teoretická část

2.1 Produkty vysokoteplotního spalování uhlí

Vysokoteplotním spalováním uhlí rozumíme exotermickou reakci uhlí s kyslíkem za teplot od 1150°C do 1750°C. Při této reakci dochází k uvolňování chemické energie oxidací uhlíku, vodíku a síry obsažené v palivu. Palivo obsahuje ještě další složky, hlavně dusík, kyslík, vodu a popeloviny. V České republice je v energetice pro vysokoteplotní spalování uhlí používáno technologie práškových kotlů s granulacním ohništěm. Při spalování v práškovém kotli je nejprve uhlí namleto v tlukadlových nebo ventilátorových mlýnech na maximální velikost zrn do 1 mm aby byla zvětšena měrná plocha paliva. Zároveň je palivo sušeno buď horkým vzduchem, nebo zpětně odebíranými spalinami pro snížení množství vody v palivu. Po namletí je uhlí přes práškové hořáky pneumaticky dopraveno do spalovací komory, tuto směs označujeme jako primární. Jako nosné médium je použit vzduch, spaliny nebo jejich kombinace. Do práškových hořáků je zároveň přiveden další spalovací vzduch tzv. sekundární vzduch. Mimo práškové hořáky je ještě přiveden terciální vzduch označovaný jako dohořívací [1].

Při spalování paliva dochází ke vzniku odpadních produktů, které považujeme za zdraví škodlivé a zatěžující životní prostředí. Jedná se zejména o tuhé znečišťující látky, oxidy síry, dusíku a uhlíku. Pro povolení provozování nového zdroje těchto látek požaduje legislativa o přípustné úrovni znečištění provést výpočet úrovně znečišťování. Výpočet je prováděn součinem emisního faktoru a počtem jednotek veličiny na stacionárním zdroji. Tyto faktory se dále použijí pro vypracování rozptylové studie, která je nezbytná pro udělení povolení k provozu zdroje.

Stanovení množství vypouštěné znečišťující látky:

$$E_z = E_f \cdot M \quad (1)$$

E_z množství vypouštěné znečišťující látky [kg]

E_f emisní faktor [$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$]

M množství jednotek [t]

V následující tabulce jsou uvedeny emisní faktory pro spalování paliv. Při použití této tabulky jsou jednotky M počítány v tunách a emisní faktor má rozměr v $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$. Koeficient A_p udává procentuální obsah popela v původním vzorku pevného paliva, S_p obsah síry [2], [3].

Druh paliva	Druh topeniště	TZL	SO ₂	NO _x	CO	Jednotka
všechna pevná paliva mimo černé uhlí, koks a dřevo	pevný rošt	1,0 x Ap	19,0 x Sp	2,0	45,0	kg·t ⁻¹ spáleného paliva
	pásový rošt s pohazováním	5,0 x Ap	19,0 x Sp	3,0	1,0	
	pohyblivý rošt (přesuvný, vratný aj.) a kombinace rošt + olej rošt + plyn	3,5 x Ap	19,0 x Sp	3,0	1,0	
	granulační a kombinace rošt + prášek rošt + plyn	5,5 x Ap	19,0 x Sp	6,0	0,5	
	výtavné	5,5 x Ap	19,0 x Sp	15,0	0,5	
	cyklónové	1,5 x Ap	19,0 x Sp	27,5	0,5	
černé uhlí a koks	pevný rošt	1,0 x Ap	19,0 x Sp	2,0	45,0	
	pásový rošt s pohazováním	5,0 x Ap	19,0 x Sp	7,5	1,0	
	pohyblivý rošt (přesuvný, vratný aj.) a kombinace rošt + olej rošt + plyn	3,5 x Ap	19,0 x Sp	7,5	1,0	
	granulační a kombinace rošt + prášek rošt + plyn	8,5 x Ap	19,0 x Sp	9,0	0,5	
	tavící	5,5 x Ap	19,0 x Sp	15,0	0,5	
	cyklónové	1,5 x Ap	19,0 x Sp	27,5	0,5	

Tab. 1. Hodnoty emisních faktorů [3]

Při vysokoteplotním spalování uhlí v práškových ohništích se minerály obsažené v palivu, označované jako popeloviny, ohřejí na teplotu až přes 1600°C. Převážná část minerálů se roztaví a po ochlazení je vylučována buď formou strusky, nebo popílku ve spalinách ve formě TZL.

Velikost zrn popílku je 1 až 100 μm, mají zaoblený, kulovitý tvar s výskytem mikrosfér s množstvím mikročástic o velikosti 0,1 až 0,5 μm. Na těchto mikročásticích jsou zvýšené výskyty těžkých kovů obsažených v původním palivu (Hg, Pb, As, Cd) [4].

Při výpočtu emisí pomocí rozptylových modelů dle zákona č.201/2012 o ochraně ovzduší je stanoveno procentuální množství frakcí do PM_{10} a do $PM_{2,5}$ v TZL dle použité technologie odlučování, jak uvádí následující tabulka:

Druh odlučovače	Podíl v TZL [%]	
	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Filtry textilní s regenerací, keramický	85	60
Filtry se zrnitou vrstvou	85	55
Filtr slinutý, lamelový	100	99
Elektrostatické	85	55
Suché mechanické cyklóny	65	35
Suché mechanické multicyklóny	70	45
Mokrý rozprašovací, pěnový	90	60
Mokrý vírový, hladinový	90	50
Mokrý proudový, rotační	90	75
Mokrý kondenzační	85	55
Odsíření - mokré	80	60

Tab. 2: Podíl PM_{10} a $PM_{2,5}$ v emisích TZL za odlučovačem [5]

Při spalování uhlí se větší množství síry oxiduje na oxid siřičitý SO_2 , až 98%, a jen malá část přechází do formy oxidu sírového SO_3 , 2%. Malá část je zachycena v popelovinách, ostatní je součástí spalin ve formě plynné látky.

Vysokoteplotní spalování uhlí, za současného stavu technologií, neumožňuje významně ovlivnit tvorbu tohoto polutantu v této fázi procesu. V současné době jsou již velice propracovány a realizovány technologie, s účinností přes 98 %, k odstranění SO_2 ze spalin. V ČR díky tomu došlo od roku 1991 do roku 2015 k poklesu SO_2 v ovzduší téměř o 93 % od velkých stacionárních znečišťujících zdrojů s výkonem nad 5 MW [6].

Sloučeniny NO_x vznikající při spalování tvoří z větší části oxid dusnatý NO a z menší části, do 10 %, oxid dusičitý NO_2 . Vznik NO_x je rozdělován do tří kategorií, lišící se podmínkami umožňující reakci dusíku s kyslíkem a původem dusíku.

Tzv. promptní NO_x , vzniká i při hoření stechiometrické směsi, pokud doba hoření je řádově nižší než čas potřebný k dosažení rovnovážné koncentrace. Ve vysokoteplotních spalovacích procesech v uhelných elektrárnách je množství takto vzniklých oxidů dusíku zanedbatelný.

Tzv. termický NO_x se vytváří z molekulárního dusíku a je závislý na přítomnosti kyslíku, vysoké teplotě a době pobytu v reakční zóně. V uhelné energetice tvoří termický NO_x až 20% obsahu veškerých oxidů dusíku obsažených ve spalinách.

Tzv. palivový NO_x vzniká v oblasti plamene a jako jediný je výsledkem reakcí dusíku vázaného v palivu. Mechanismus konverze tohoto dusíku na NO_x je výsledkem mnoha interakcí mezi tuhými, plynnými a kapalnými reagenty a není doposud detailně popsán[7].

Obsah dusíku v hnědém uhlí, používaném v energetickém průmyslu je okolo 1 %. Vzniklé sloučeniny NO_x tvoří až 80% veškerých oxidů dusíku ve spalinách.

Uhlík C je hlavní složka uhlí pro spalování ve vysokoteplotním procesu. Hnědé uhlí, které se používá v energetice, má obsah tohoto prvku do 70 % v hořlavé části, vzhledem k celkovému složení okolo 40 %. Při dokonalém spalování, kdy se atom uhlíku naváže na dva atomy kyslíku, se z jednoho kilogramu uvolní energie 33 910 kJ. Při nedokonalém spalování, kdy se uhlík naváže pouze s jedním atomem kyslíku a vytvoří oxid uhelnatý CO, se uvolní pouze 10 130 kJ. Aby se zabránilo energetickým ztrátám a vyšší produkci jedovatého CO při nedokonalém spalování, spalování probíhá s přebytkem vzduchu označovaným α .

$$\alpha = \frac{V_v}{V_{v \min}} \geq 1 \quad (2)$$

V_v množství vzduchu skutečně přivedeného do spalovací komory [m^3]

$V_{v \min}$ teoretické množství vzduchu potřebné k dokonalému spálení [m^3]

Parametr α je závislý na typu kotle, hodnota α je 1,2 pro práškové kotle s granulačním ohništěm s vysokoteplotním spalováním [1].

2.1.1 Distribuce těžkých kovů do frakcí vysokoteplotního spalování

Při spalování uhlí dochází k distribuci přítomných těžkých kovů mezi ložový popel (škváru), úletový popílek, plynný aerosol a plynné emise. Nejvyšší obsahy As, Cd, Hg a Pb byly zjištěny na nejmenších částicích úletového popílku, které jsou transportovány na velké vzdálenosti [4], [8].

Vzhledem k tomu, že nejjemnější frakce popílku mají největší měrný povrch, je také koncentrace těžkých kovů v těchto frakcích nejvyšší. Maximální koncentrace těžkých kovů se nachází v nejjemnější frakci úletového popílku s průměrem částic pod 10 μm .

K obohacení všemi výše zmíněnými kovy dochází v úletovém popílku pravděpodobně z důvodu adsorpce nebo kondenzace par těchto látek na povrchu jemných částic. V submikronových frakcích úletového popílku byly nalezeny As, Cd i Pb. Tyto prvky jsou za všech okolností těkavé při středních teplotách (600 – 1400 K).

Mechanismus tohoto transportu bývá obvykle popisován tak, že těkavé těžké kovy v průběhu spalování odcházejí z ohniště v plynném stavu z důvodů vysokých teplot ve spalovací zóně. Poté, co opustí tuto zónu, dojde k významnému poklesu teplot a tím i k ochlazení kouřových plynů unášených částic popílku a par těžkých kovů. To vede ke kondenzaci nebo k adsorpci par těžkých kovů na povrch popílku.

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující těkavost prvků při spalování uhlí podmínky spalování (hlavně oxidační či redukční prostředí) Významnou roli přitom může hrát i obsah popelovin v uhlí. [9], [10].

Těžké kovy, které obohacují ložový popel nejsou při teplotě v zóně hoření těkavé. Zůstávají v kondenzovaném stavu a jejich distribuce mezi ložový popel a úletový popílek je výrazně posunuta k ložovému popelu. Naopak těžké kovy nacházející se v úletovém popílku jsou při teplotě hoření těkavé a nacházejí se tudíž v spalovací zóně v plynném stavu. Vzhledem k tomu, že u průmyslových spalovacích zařízení je ložový popel ze spalovací zóny rychle odstraňován, je jeho kontakt s těmito prvky krátký a nemůže dojít k jeho obohacení. Naopak kontakt úletového popílku s těmito prvky je podstatně delší. Po opuštění zóny spalování a po následném poklesu teploty dochází ke kondenzaci či adsorpci těchto prvků na úletový popílek a tím i k jeho obohacování o tyto prvky.

Většina těžkých kovů, jež byly autory nalezeny v plynné fázi a v úletovém popílku má nízké body varu. Většina těžkých kovů nalezených v ložovém popelu má oproti tomu teplotu varu vysokou. Je tedy pravděpodobnější, že o rozdělení těžkých kovů mezi ložový a úletový popel nebude rozhodovat pouze bod varu příslušného kovu, ale i forma jeho výskytu v uhlí. Prvky v uhlí se vyskytují často ve formě hlinitokřemičitanů, anorganických síranů či organických komplexů. Hlinitokřemičitany se při spalování uhlí nerozkládají a prvky v nich obsažené přecházejí ve většině případů do ložového popela.

Naopak prvky vázané na sírany či organickou frakci uhlí se během první fáze hoření uvolňují a přecházejí do plynného stavu. V dalším stadiu pak mohou být oxidovány za vzniku méně těkavých oxidů, což umožňuje jejich kondenzaci či adsorpci na povrchu pevných částic úletového popílku [4], [11], [12].

Emise v plynné formě se týkají pouze rtuti a arsenu. V plynné fázi se nachází zejména Hg, je těkavá již při teplotě pod 600 K a její těkavost neovlivňují ani spalovací podmínky ani obsah popelovin v uhlí [8].

Během spalování uhlí dochází při teplotách 700-800 °C k tepelnému rozkladu sloučenin rtuti za vzniku plynné elementární rtuti Hg^0 , která odchází ze spalovací komory v proudu spalin. Předpokládané množství rtuti, které se zachytí v ložovém popelu je menší než 2 % z celkového množství rtuti přítomného v spalovaném uhlí. Po ochlazení spalin ve výměnících na výrobu páry (na 200-250 °C) se velká část rtuti oxiduje přítomnými halogenovými složkami na $HgCl_2$, případně i Hg_2Cl_2 .

Rtuť z velké části z kondenzuje, nebo je zachycena na povrchu úletového popela, zbývající podíl je pak emitován do atmosféry. Rtuť se ve spalinách vyskytuje ve formě Hg^0 nebo jako oxidovaná forma Hg^{2+} ($HgCl_2$, Hg_2Cl_2 nebo HgO). Rozsah koncentrací rtuti (Hg^0 a Hg^{2+}) ve spalinách ze spalování uhlí se pohybuje od 5 do 20 $\mu g \cdot Nm^{-3}$ [8], [13].

Černé a hnědé uhlí obsahují srovnatelné koncentrace rtuti, pro černé uhlí je však charakteristický nižší obsah chloru a vyšší obsah vápníku v porovnání s hnědým uhlím. Spaliny ze spalování černého uhlí proto obsahují větší množství Hg^0 oproti spalinám z hnědého uhlí, kde je Hg^{2+} dominantní složkou rtuti. Obecně lze říci, že rtuť je ve spalinách z uhlí zastoupena z 20-50 % jako Hg^0 , z 50-80 % jako $HgCl_2$ a z 1-5 % ve formě organortuťnatých sloučenin. Forma výskytu rtuti ve spalinách ovlivňuje podíl zachycené rtuti ve spalovacím zařízení. Oxidovaná forma Hg^{2+} může být odstraněna současně se zachytáváním SO_3 (při mokřím nebo suchém odsiřování spalin). Naproti tomu elementární rtuť Hg^0 se odstraňuje velice obtížně [8], [14].

2.2 Principy technologií snižující emise

2.2.1 Metody odsiřování spalin

Odstraňování oxidů síry vznikajících při spalování uhlí v energetice patří k neúčinnějším technologiím pro snižování obsahu polutantů v emisích. Při spalování tuhých paliv většina síry oxiduje na SO₂, na SO₃ přechází pouze 2 %. Vyprodukované množství emisí síry závisí na měrné sirnatosti paliva:

$$S_m = \frac{S_p \cdot 10}{Q_r} \quad (3)$$

S_m množství síry [g·MJ⁻¹]

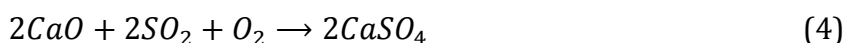
S_p procentuální obsah síry v palivu

Q_r výhřevnost paliva [MJ·kg⁻¹]

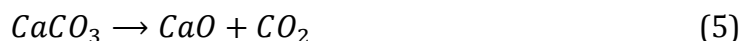
V české republice se v energetice využívá tři metod pro odstranění oxidů síry ve spalinách:

- suchá metoda dávkování aditiva do spalovacího procesu, je použita u fluidních kotlů, např. elektrárna Ledvice, Poříčí II a Tisová I
- polosuchá metoda je použita u dvou bloků elektrárny Ledvice
- mokrá vápencová vypírka u zdrojů o výkonu 110MW_e a vyšších, např. Chvaletice, Opatovice nad Labem, Mělník

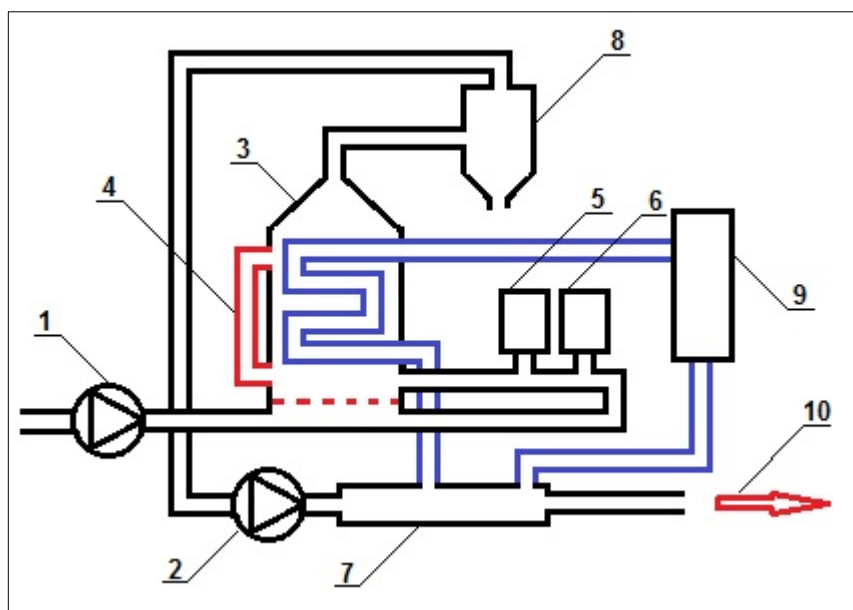
Suchá metoda dávkování přímo do spalovacího procesu je u nás používána pouze u fluidních kotlů, které zaručují vhodné teploty a dobu setrvání aditiva ve spalovacím procesu. Při použití této technologie je do spalovací komory fluidního kotle přiveden aditivum, např. CaO, CaCO₃. Reakce CaO s SO₂ probíhá při teplotách od 600°C do 1000°C :



Při použití uhličitanu vápenatého jako aditiva dojde nejprve k jeho kalcinaci při teplotách vyšších než 825°C :



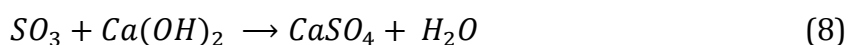
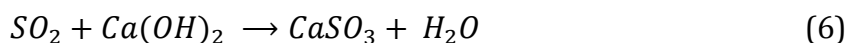
kde se dále oxid vápenatý zúčastňuje chemické reakce uvedené v rovnici (4). Výsledný síran vápenatý je z emisí odloučen společně s popílčkem v technologiích pro snížení úletu TZL. Výhodou použití této metody u fluidních kotlů je dlouhé setrvání aditiva v optimálních podmínkách a nízká ekonomická náročnost na výstavbu technologie. Nevýhodou je nízká účinnost této reakce, což přináší vysokou spotřebu aditiva, nutnost skladování, a velký objem jeho nezreagované části v popílku. Při použití ve fluidních kotlích s cirkulující fluidní vrstvou je dosahována účinnost kolem 90 %.



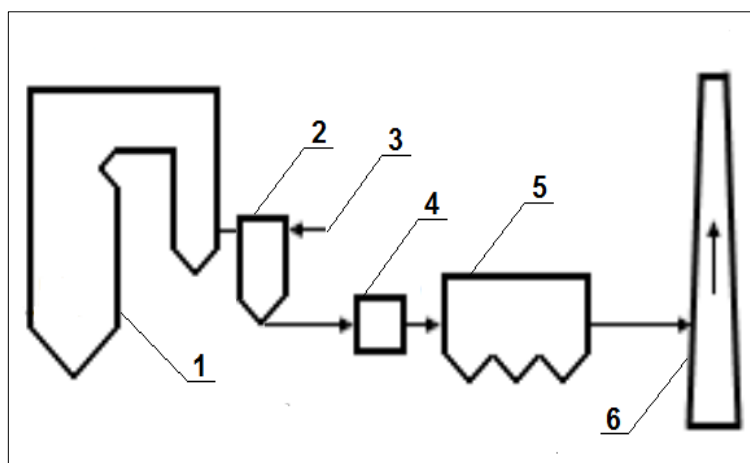
Obr. 1. Schéma fluidního kotle se suchým odsiřováním [obr. vlastní]

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1. Vzduchový ventilátor | 6. Zásobník aditiva |
| 2. Kouřový ventilátor | 7. Předehříváč napájecí vody |
| 3. Fluidní kotel | 8. Odlučovač TZL |
| 4. Recirkulace | 9. Parní turbína |
| 5. Zásobník paliva | 10. Komín |

Polosuchá metoda odsíření spalin je technologie, která vstřikuje emulzi hydroxidu vápenatého do spalin v reaktoru umístěného mezi kotlem a odlučovačem TZL. Následně dochází k reakci emulze s oxidy síry a odpaření vodních kapek:



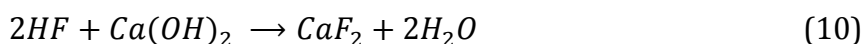
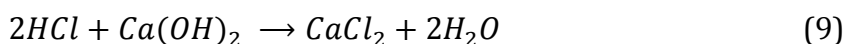
Suché zreagované částičky jsou unášeny spalinami na tkaninový filtr, kde ještě dobíhá chemická reakce ve vrstvě popílku a nezreagovaného vápence.



Obr. 2. Schéma polosuchého odsíření [obr. vlastní]

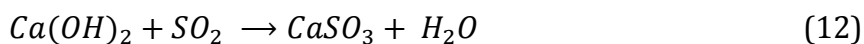
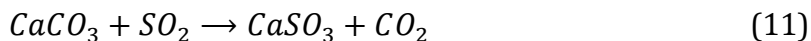
- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| 1. Spalovací kotel | 4. Ohřev spalin |
| 2. Reaktor | 5. Tkaninový filtr |
| 3. Vstřik hydroxidu vápenatého | 6. Výstup spalin |

Tato metoda má účinnost 80 až 90%. Její výhodou je reaktivita s dalšími plynnými látkami, např. s fluorovodíkem a chlorovodíkem, a jejich odstraněním ze spalin:

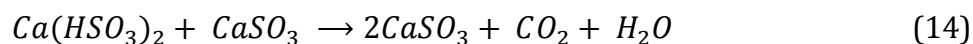


Účinnost odstranění chlorovodíku a fluorovodíku je přes 90%. Nevýhodou je nutnost používat tkaninové filtry (v případě použití elektrostatických odlučovačů dochází ke snížení účinnosti o cca 10%) a k ochlazování spalin, kdy vzniká riziko dosažení teplot rosného bodu s následným korozivním namáháním technologie.

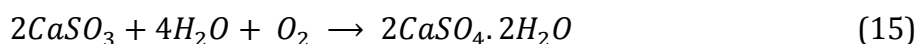
Mokrý vápencová vypírka je nejpoužívanější metoda v energetice pro snížení úletu emisí síry při vysokoteplotním spalování uhlí. Její princip spočívá v oplachování spalin v absorberu pomocí cirkulačních čerpadel a několika sprchových pater vodní suspenzí uhličitanu vápenatého nebo vápenné vodní suspenze, které reagují s oxidy síry:



Výsledný siřičitan vápenatý v absorberu dále reaguje:



Při dodržení optimální hodnoty pH v rozmezí 5 až 6, dochází k další oxidaci:



V praxi je u absorbéru sledováno a udržováno pH v mezích od 5 do 5,5 pH, a podle jeho hodnoty je sorbent odtahován k dalšímu zpracování. Hlavní výhodou mokré vápencové vypírky je její účinnost přes 98 %, zpracování odtaženého sorbentu na sádrovec s následným využitím např. ve stavebnictví a zachytávání TZL pomocí setrvačného principu. Nevýhodou je náročnost na prostor a vyšší náklady na výstavbu a údržbu [15], [16], [17].

2.2.2 Metody snižování oxidů dusíku ve spalínách

Pro snížení množství NO_x ve spalínách jsou v energetice používány dva způsoby opatření pro jejich redukci. Primární opatření, kterým je snižován vznik a tvorba NO_x v průběhu spalovacího procesu, a sekundární, kterým se redukuje již vzniklé škodlivé sloučeniny dusíku.

Primární opatření ovlivňují podmínky, za kterých dochází k tvorbě NO_x při spalování paliva. Především je snižován přebytek kyslíku, teplota plamene a doby setrvání paliva ve vysokoteplotní zóně. Následující tabulka uvádí seznam obvyklých primárních opatření používaných u velkých zdrojů spalujících uhlí a jejich vliv na redukci NO_x:

Primární opatření	Obvyklý podíl na snížení NO _x	Poznámka
nízký přebytek vzduchu	10 - 44 %	úprava regulačních algoritmů kotle pro snížení množství spalovacího vzduchu
odstupňování vzduchu	10 - 70 %	přidávání vzduchových kanálů do spalovací komory nad palivové hořáky pro vytváření dalších spalovacích zón
recirkulace spalin	20 - 50 %	odběr spalin a jejich zpětné zavedení do spalovací komory ve směsi se spalovacím vzduchem pro snížení obsahu O ₂
nízkoemisní hořáky	20 - 60 %	hořáky, které upravují faktory pro zpomalení smíchání paliva a vzduchu, snížení přístupu O ₂ a snížení teploty plamene, stále se zdokonalují

Tab. 3. Seznam primárních opatření pro snížení NO_x vysokoteplotní spalování uhlí [tab. vlastní]

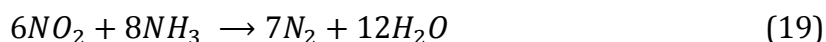
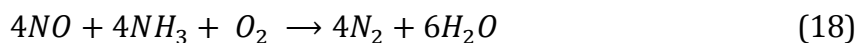
Primární opatření sebou přináší riziko nedokonalého spalování s následnou zvýšenou tvorbou CO a nestabilitu spalování při nižších výkonech bloku. Výhodou jsou relativně nízké provozní náklady.

Sekundární opatření je obvykle realizováno buď selektivní katalytickou redukcí (SCR) nebo selektivní nekatalytickou redukcí (SNCR). Obě technologie vytváří podmínky pro reakci NO s ionty NH_2^- obsažené v redukčních činidlech:

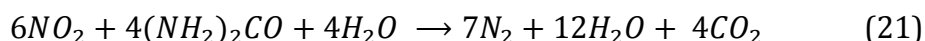
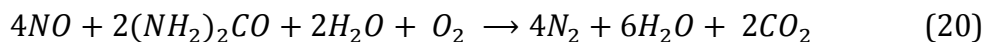


Jako zdroj radikálů NH_2^- je používána močovina nebo čpavková voda.

Technologie metody SCR dosahuje reakce reagentů s emisemi NO_x za pomoci katalyzátoru. Vstřikování redukční činidla do spalín probíhá těsně před vstupem do katalyzátoru, kde následně dochází k reakcím za teplot v rozsahu 170° až 510°C. Při použití čpavku:



V případě použití močoviny:

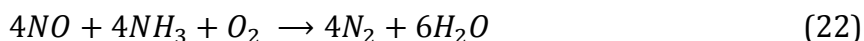


Katalyzátory rozdělujeme podle typu materiálu, který obsahují:

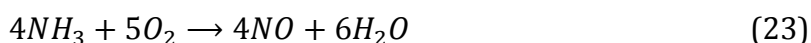
- těžké kovy na základě TiO_2 s vanadem, wolframem a molybdenem. Pracovní teplota je 300° až 450°C.
- porézní aluminosilikáty – zeolity. Pracovní teplota je 350° až 600°C.
- krystalický obal z fosforečnanů železa s částicemi oxidů železa
- pelety z aktivního uhlí smíchaného s inertními prvky. Pracovní teplota je 100° až 220°C.

Technologie SCR [12] má schopnost snížit emise NO_x až o 95%.

V případě technologie SNCR probíhají reakce ve spalovací komoře v místě kde je dostatečná teplota nutná k probíhání redukčních reakcí NO_x s výsledným vznikem molekulárního dusíku. Rozsah těchto teplot v rozmezí 850° až 1100°C, v závislosti na použitém činidle, je označován jako „teplotní okno“. Po vstříknutí močoviny, jako reagentu, probíhají reakce:



a také zároveň nežádoucí:



Při správné teplotě dominuje redukční reakce, při vyšší teplotě reakce oxidační, proto je důležité při používání technologie SNCR dodržovat teplotní zónu v místě vstřikování reagentu. V praxi se to řeší systémem vstřikovacích trysek ve více patrech a dle teplot ve spalovací komoře je řízen jejich provoz. Účinnost této metody dosahuje až 50 % redukce NO_x.

U obou technologií sekundárních opatření je sledován přebytek reagentu ve spalínách, tzv. čpavkový skluz ve spalínách. Jde o nezreagovaný zbytek po procesu denitrifikace s negativním vlivem na následnou technologii. U SCR je dodržován maximální skluz do 5 mg.Nm⁻³ a u SNCR 10 mg.Nm⁻³ [17], [18], [19].

2.2.3 Metody snižování emisí tuhých znečišťujících látek

Princip odlučování tuhých částic spočívá v jejich separaci z proudu plynu. Částice mohou být odlučovány setrvačně, gravitačně, odstředivě, difúzně, síťově, intercepčně a elektricky. U velkých energetických zdrojů se nejčastěji používá elektrický princip pomocí elektroodlučovačů, síťový princip pomocí tkaninových filtrů a odstředivý princip přes cyklóny, který je ale v současné době nevyhovující z hlediska účinnosti a je nahrazován předchozími dvěma[17].

Setrvačný princip využívá vyšší setrvačnosti tuhých částic než nosného média – plynu. Proud směsi plynu a částic je po přivedení do odlučovače přinucen k prudké změně směru toku pomocí překážky, například vestaveb ve formě lamel, žaluzií, vláken nebo vodních kapek. Protože těžší částice mají vyšší setrvačnost, je změna jejich trajektorie méně zakřivená než trajektorie plynu. Částice tak narážejí do překážky, ztrácí svou kinetickou energii a padají dolů, kde jsou odváděny k dalšímu zpracování. Nejčastěji používaným způsobem setrvačných odlučovačů v energetice jsou sprchová patra v absorbérech odsiřovacích linek. Prachová částice se zde smočí, stoupne její hmotnost a více na ní působí gravitace.

Gravitační odlučovače se používají k separaci těch největších částic jako doplněk před jinými způsoby odlučování. Používají se ve formě usazovacích komor a výsypek pod kouřovody [20].

Platí vztah:

$$v_u = \sqrt{\frac{4a(\rho_2 - \rho)g}{3C_D\rho}} \quad (24)$$

v_u	usazovací rychlost částice [m·s ⁻¹]
a	průměr částice [m]
ρ_2	hustota částice [kg·m ⁻³]
ρ	hustota odlučovaného plynu [kg·m ⁻³]
g	hodnota gravitačního zrychlení [m·s ⁻²]

C_D hodnota součinitele odporu závislého na Reynoldsovu kritériu obtékání částice:

$$R_e = \frac{v_r \rho a}{\eta} \quad (25)$$

η dynamická viskozita [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$]

v_r vzájemná relativní rychlost částice a plynu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Jestliže je $R_e < 0,2$ platí že:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad (26)$$

Pádová rychlost v_p [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je pak rovna:

$$v_p = \frac{a^2(\rho_2 - \rho)g}{18\eta} \quad (27)$$

Odstředivé odlučovače využívají rozdílnou hustotu odlučovaných částic a nosného plynu. U cyklónového odstředivého odlučovače je směs plynu a částic přivedena tangenciálně do kruhové nádoby kde je uvedena do rotačního pohybu. Při rotačním pohybu jsou těžší tuhé částice vytlačovány více od středu ke stěnám kruhové nádoby a díky vyšší hmotnosti rotují směrem dolů.

Difúzní princip je využíván při odlučování částic polévatého prachu při průchodu vláknitou vrstvou. Nejdůležitějším parametrem pro difúzní princip je tzv. Pecletovo kritérium:

$$P_e = \frac{v_0 d_N}{D_B} \quad (28)$$

v_0 rychlost vzduchu ve vláknité vrstvě [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

d_N střední aritmetický průměr vlákna [m]

D_B součinitel tepelné (Brownovské) difúze [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]:

$$D_B = kTB \quad (29)$$

k Boltzmannova konstanta $1,3805\cdot 10^{-23}$ [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]

T absolutní teplota [K]

B pohyblivost částice [$\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Čím nižší je hodnota Pecletova kritéria, tím vyšší je odlučivost. Nejvíce používané zařízení v energetice využívající difúzní princip jsou tzv. tkaninové rukávové filtry, označované také jako hadicové. Při vstupu do filtru spaliny nejprve narážejí na vestavěnou přepážku a jsou přinuceny k prudké změně směru – zde se využívá setrvačný princip. Po té spaliny prostupují skrz rukávy tkaninových filtrů, které jsou napnuty na konstrukcích a mají otevřenou vrchní část pro výstup filtrovaného

plynu. Částice TZL jsou zachyceny na povrchu tkaniny v místě vstupu spalin. Velmi důležitou součástí účinnosti odlučování je regenerace rukávů. V praxi se používá několik různých metod:

- přerušení filtrace s následným opadáním zachycených částic do výsypky
- cyklické třepání tkaninou mechanicky nebo akusticky za provozu
- krátkodobé reverzní proudění vzduchu

Nejlepší výsledky se dosahují pomocí krátkého vysokotlakého impulzu reverzního vzduchu zajištěného v každém rukávu vlastní tryskou. Při impulzu dojde k deformaci rukávu (jeho vyboulení) a spadu prachu do výsypky [20].

V elektrostatických odlučovačích (EO) je využíváno nabíjení popílku monopolárním nábojem v silném elektrickém poli. Spaliny určené k čištění vstupují do EO a proudí kolem vysokonapěťových (VNE) a usazovacích (US) elektrod. Vysokonapěťové elektrody jsou napájeny ze zdrojů velmi vysokého napětí (VVN) v rozmezí 40 až 70kV. Popílek se v silném elektrickém poli ionizuje při korónovém výboji tvořeném VN elektrodami a při průletu kolem US elektrod na nich ulpí. Oba typy elektrod jsou vybaveny oklepáváním pro shození zachyceného popílku do výsypek pod elektrodami. Popílek je po té pneumatickou dopravou (SOP) transportován k dalšímu zpracování. Nejdůležitější částí EO jsou regulátory stejnosměrných VVN zdrojů, které mají za úkol nastavit optimální hodnotu intenzity elektrostatického pole, aby docházelo k maximálnímu nabití prachových částic a zároveň nedocházelo k výbojům mezi elektrodami [21].

2.3 Fyzikální principy kontinuálních měření emisí

2.3.1 Kontinuální měření emisí oxidů síry a dusíku

Všechny spalovací zdroje emitující znečištění ovzduší o tepelném výkonu 50 MW nebo vyšším musí dle Vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování provádět kontinuální měření emisí, jejich kalibraci a ověřování správnosti výsledků. Analyzátory plynů, používané v energetice pro kontinuální měření, pracují na optickém principu. Zde je využívána vlastnost molekul a atomů excitovat na vyšší energetické hladiny při dopadu elektromagnetického záření o energii odpovídající rozdílu povolených energetických hladin. Přístroj vysílá elektromagnetické záření v úzkém frekvenčním pásmu, které svou energií odpovídá splnění podmínky pro excitaci látky, jejíž výskyt a množství měří. Pokud se sledovaná látka v kontrolované oblasti vyskytuje, dojde k částečnému pohlcení přístrojem emitovaného záření hledanou látkou. Úbytek intenzity je změřen a pomocí Lambert-Beerova zákona je dopočítána koncentrace látky:

$$I = I_0 e^{-k c L} \quad (30)$$

I	naměřená intenzita [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
I_0	počáteční intenzita [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
k	extinkční koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
L	délka měřicí trasy [m]
c	koncentrace [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]

Ve fotometrii se používá veličina E - extinkce (absorbance)

$$E = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (31)$$

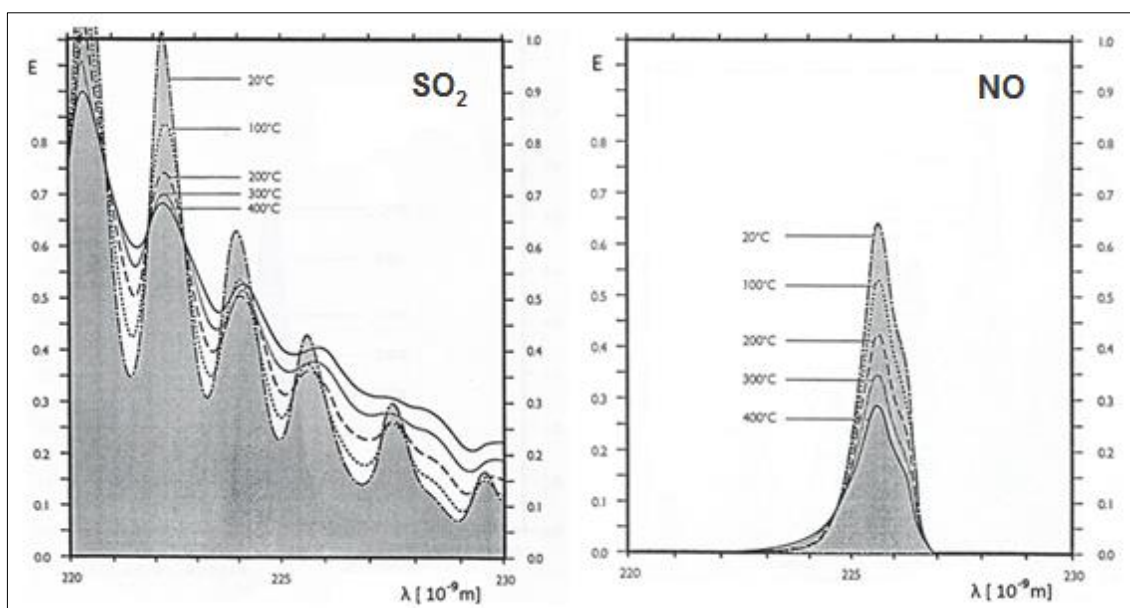
Po dosazení do (30)

$$c = \left(\frac{2,303}{kL} \right) E \quad (32)$$

kde výraz v závorce je konstantní a dostáváme lineární závislost, která je nevhodnější pro měření, kalibrace a nastavování měřících přístrojů. Extinkce E je tedy závislá na vlnové délce ale také na teplotě vyhodnocované látky.

Pro měření koncentrací SO_2 a NO je použita ultrafialová část spektra elektromagnetického záření o vlnových délkách od 218 nm do 233 nm. Absorpce záření SO_2 v uvedeném pásmu periodicky kolísá a vykazuje vysokou extinkci, jejíž intenzita s prodloužením vlnové délky klesá.

Struktura pohlcování záření je vytvořena jednotlivými absorpčními pásy, ležící blízko sebe, takže se vzájemně překrývají. NO vykazuje dva absorpční splývající pásy.



Graf 1. Extinkční křivky SO₂ a NO, upraveno podle [22]

Ostatní plyny v tomto pásmu vlnových délek znatelně neabsorbují, křížová citlivost se tedy zanedbává [22].

2.3.2 Kontinuální měření emisí tuhých znečišťujících látek

Při kontinuálním měření TZL je také používán optický princip jako u měření SO₂ a NO. Úbytek intenzity světla je ale způsoben rozptylem paprsku na povrchu prachové částice.

Přístroj vysílá světlo výkonnou LED o vlnové délce 450 až 700 nm a na odraženém světle, od reflektoru na druhé straně kouřovodu, se měří úbytek intenzity. Vzhledem k tomu že, tvar povrchu prachových částic je závislý na technologii spalování a druhu paliva, každý typ popílku rozptyluje světlo, při stejných koncentracích, různě.

Před zavedením přístroje do provozu jsou prováděna kalibrační gravimetrická měření.

Gravimetrická měření se provádí síťovým odběrem v celém průřezu kouřovodu a neměřené hodnoty se porovnají s výstupem měřicího přístroje.

Po těchto měřeních se nastavují regresní závislosti, viz vztahy (30), (33) kap. 2.3.1.

2.4 Modelování emisí tuhých znečišťujících látek SYMOS'97 (verze2013)

Pro modelový výpočet znečištění ze stacionárních zdrojů elektrárny Opatovice a elektrárny Chvaletice byl použita metodika SYMOS'97 od firmy IDEA-ENVI, s.r.o. Tato metodika je doporučena dle přílohy č. 6 vyhlášky č. 330/2012 Sb., o posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích a popis případů jejich použití. Veškeré výpočty byly provedeny pomocí software SYMOS'97 ve verzi 2013.

Použitá metodika modelace výpočtu znečištění umožňuje:

- výpočet znečištění ovzduší plynnými látkami a prachem z bodových, liniových a plošných zdrojů
- výpočet znečištění od většího počtu zdrojů
- stanovit charakteristiky znečištění v husté geometrické síti referenčních bodů a připravit tímto způsobem podklady pro názorné kartografické zpracování výsledků výpočtů
- brát v úvahu statistické rozložení směru a rychlosti větru vztažené ke třídám stability mezní vrstvy ovzduší podle klasifikace Bubníka a Koldovského
- odhad imisní koncentrace znečišťujících látek při bezvětrí a pod inverzní vrstvou ve složitém terénu.

Pro každý referenční bod umožňuje metodika výpočet těchto základních charakteristik znečištění ovzduší:

- maximální možné krátkodobé (hodinové) hodnoty imisních koncentrací znečišťujících látek, které se mohou vyskytnout ve všech třídách rychlosti větru a stability ovzduší
- maximální možné krátkodobé (hodinové) hodnoty imisních koncentrací znečišťujících látek bez ohledu na třídu stability a rychlost větru
- roční průměrné imisní koncentrace
- dobu trvání imisních koncentrací převyšujících určité předem zadané hodnoty (např. imisní limity).

Jako doplňkové charakteristiky je podle metodiky možno:

- stanovit výšku komína s ohledem na splnění imisních limitů
- stanovit podíl zdrojů znečištění ovzduší na celkovém znečištění do vzdálenosti 100 km od zdrojů
- stanovit doby překročení zvolených imisních koncentrací pro zdroj se sezónně proměnnou emisí
- vypočítat spad prachu
- vyhodnotit rozptyl exhalací vypouštěných chladicími věžemi.

Metodika je určena především pro vypracování rozptylových studií jakožto podkladů pro hodnocení kvality ovzduší.

Protože se jedná o matematický model, který pro provedení výpočtu vyžaduje provést zjednodušení a tím i nemožnost přesného popsání všech dějů v atmosféře, které mají vliv na rozptyl znečišťujících látek, výsledky výpočtu nejsou zcela

přesné. Veškeré rovnice vychází z předpokladu maximální vzdálenosti referenčního bodu od zdroje 100 km. Vstupní klimatické údaje používají průměrné hodnoty za předchozí období a terénní profil je počítán dle hodnot výšek referenčních bodů [23].

Pro výpočet uvedených zdrojů, kdy koruna komína nebo výdech je svými rozměry zanedbatelný oproti počítaným vzdálenostem, je třeba znát následně uvedené údaje:

- poloha zdroje x_Z, y_Z [m]
- nadmořskou výšku z_Z [m]
- výšku výdechu nad terénem H [m], u nových zdrojů lze tuto výšku dopočítat
- roční dobu provozu technologie P_r [hod·r⁻¹]
- objemový tok spalin V_S [Nm³·s⁻¹] z výdechu přepočtený na normální podmínky tj. teplotu 0 °C a tlak 101 325 kPa dle vztahu:

$$V_S = V \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_s} \cdot \frac{p}{101325} \quad (33)$$

t_s teplota exhalací ve výdechu [°C]

p tlak vzduchu [Pa]

V objemový tok spalin za skutečných podmínek [m³·s⁻¹]

- množství znečišťující látky M [g·s⁻¹] za normálních podmínek
- teplotu t_s spalin [°C]
- protože je teplota spalin nižší než 80°C, je zapotřebí znát průměr výdechu nebo komína D_V [m]
- tepelnou vydatnost Q [MW] stanovenou:

$$Q = 10^{-3} \cdot V_S \cdot c_s \cdot (t_s - t_0) \quad (34)$$

V_S objemový tok spalin za normálních podmínek [Nm³·s⁻¹]

c_s měrné teplo exhalací o hodnotě 1,371 kJ·m⁻³·K⁻¹

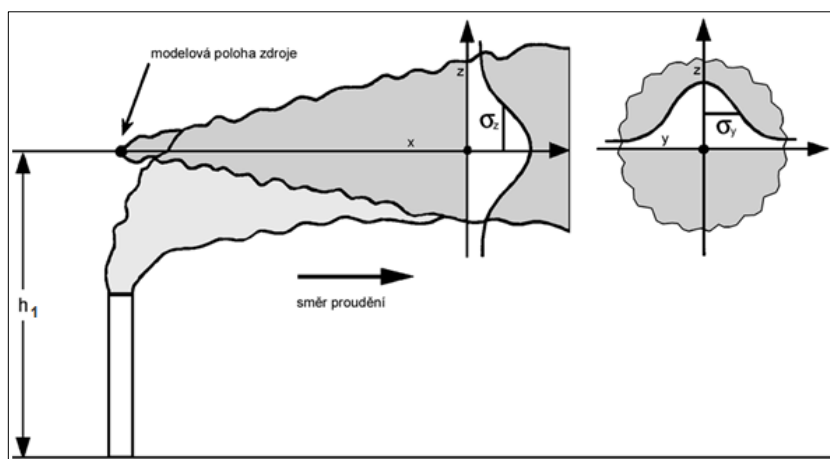
t_s teplota spalin v koruně komína nebo výdechu [°C]

t_0 teplota okolního vzduchu, předpokládáme teplotu 0°C

- pro výpočet TZL zastoupení částic PM₁₀ a PM_{2,5} viz Tab. 2

Pro výpočet imisní koncentrace plynných znečišťujících látek za stacionárního bodového zdroje, ve zvlněném terénu a za předpokladu Gaussova rozložení koncentrace ve vlečce, má rovnice tvar:

$$c = \frac{10^6 \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{hl} + V_S} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \cdot \frac{x_l}{u_{hl}}\right) \cdot K_h \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z'' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \vartheta \cdot \exp\left(-\frac{(z''' - h_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (35)$$



Obr. 3. Gaussovský model rozptylu [24]

Rovnice pro výpočet přízemní imisní koncentrace pro plynné znečišťující látky z bodového stacionárního zdroje:

$$c = \frac{10^6 \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u_{hl} + V_s} \cdot \exp\left(\frac{-y_L^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-k_u \cdot \frac{x_L}{u_{hl}}\right) \cdot K_h \cdot \left[(1 + \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(z-h_1)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + (1 - \vartheta) \cdot \exp\left(-\frac{(|z|+h_1)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right] \quad (36)$$

Výpočet pro tuhé znečišťující látky se vztahuje na částice větší než je PM₁₀, proto jsou částice PM_{2,5} a PM₁₀ počítány jako plynné.

Pro definici horizontálních souřadnic platí:

$$x_L = x \cdot \cos\lambda \quad (37)$$

$$y_L = x \cdot \sin\lambda \quad (38)$$

$$x = \sqrt{(x_z - x_r)^2 + (y_z - y_r)^2} \quad (39)$$

x_z, y_z souřadnice zdroje v základním souřadném systému [m]

x_r, y_r souřadnice referenčního bodu v základním souřadném systému [m]

λ úhel mezi směrem větru a spojnicí zdroj-referenční bod [°]

z' korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu pro přímý rozptyl [m]

z'' korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujícím odraz v dolním odhadu [m]

z''' korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujícím odraz v horním odhadu [m]

Vertikální souřadnice z' , z'' , z''' se stanovují:

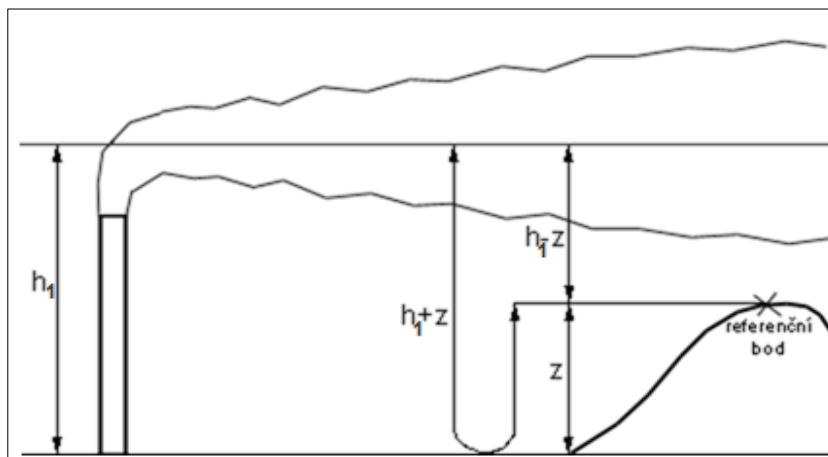
$$\text{pro } z + l \leq h_1: \quad z' = z + l \quad z'' = |z| + l \quad z''' = z - l \quad (40)$$

$$\text{pro } z + l > h_1: \quad z' = h_1 \quad z'' = |z| + h_1 - z \quad z''' = 2 \cdot z - h_1 \quad (41)$$

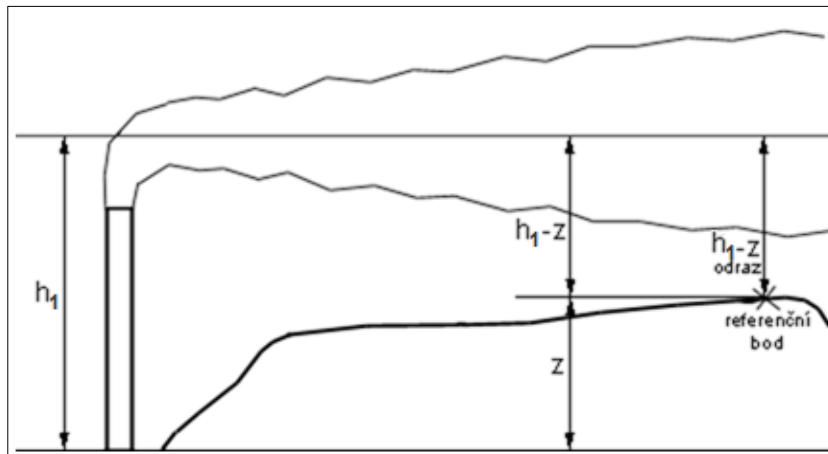
z výškový rozdíl mezi referenčním bodem a terénem v místě komína [m]

l výška referenčního bodu nad terénem [m]

h_1 efektivní výška zdroje [m]



Obr. 4. Schéma dolního odrazu [24]



Obr. 5. Schéma horního odrazu [24]

Koeficient vlivu terénu ϑ se určí pro každý pár zdroj – referenční bod z profilu nadmořské výšky $z(x')$ mezi zdrojem a referenčním bodem. Pokud je referenční bod ve stejné nebo nižší nadmořské výšce než zdroj je koeficient nulový. Pokud je referenční bod výše, platí:

$$\vartheta = \max \left(0, \frac{1}{x'(z_r - z_z)} \cdot \int_0^x (z_1(x') - 2 \cdot z_2(x')) \cdot dx' \right) \quad (42)$$

- z_r nadmořská výška terénu zdroje [m]
 z_z nadmořská výška terénu referenčního zdroje [m]
 x vzdálenost referenčního bodu a zdroje [m]

Pro výpočet použijeme vztahy:

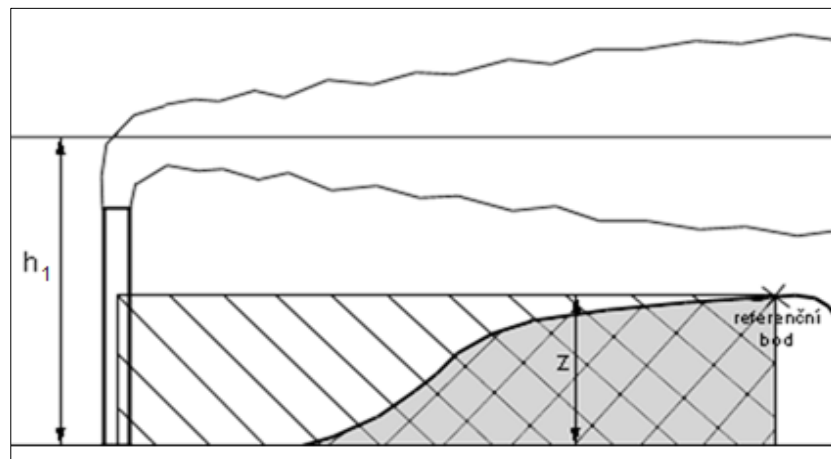
$$\text{pro } z(x') > z_z: z_1(x') = z(x') - z_z \quad (43)$$

$$\text{pro } z(x') \leq z_z: z_1(x') = 0 \quad (44)$$

$$\text{pro } z(x') > z_r: z_2(x') = z(x') - z_r \quad (45)$$

$$\text{pro } z(x') \leq z_r: z_2(x') = 0 \quad (46)$$

Pro výpočet ϑ se proloží spojitá plocha sítí zdrojů a referenčních bodů, po té se pro každou dvojici zdroj – referenční bod provede vertikální řez této plochy a z něj se vypočte integrál ϑ . Ve výsledku obdržíme matici $\vartheta_{i,k}$, kde i je číslo zdroje a k číslo referenčního bodu, kterou použijeme pro vlastní výpočet koncentrací.



Obr. 6. Schéma pro výpočet ϑ [24]

Hodnota h_1 je udávána jako efektivní výška zdroje. Je rovna součtu stavební výšky zdroje H a převýšení kouřové vlečky Δh . Ve výpočtu Δh je zahrnuta korekce na teplotní stabilitu atmosféry K_s , vliv terénu ε a postupný vznos kouřové vlečky u zdroje pomocí parametrizované hodnoty K_m .

$$\text{pro } z_m > (1 - \varepsilon) \cdot h: h_1 = z_m + \varepsilon \cdot h \quad (47)$$

$$\text{pro } z_m \leq (1 - \varepsilon) \cdot h: h_1 = h \quad (48)$$

z_m maximální hodnota nadmořské výšky terénu nad úrovní komína mezi zdrojem a referenčním bodem [m]

ε vliv terénu dle atmosférických podmínek

h je rovno součtu H a Δh bez korekce na vliv terénu

Převýšení vlečky je počítáno:

pro $x < K_m \cdot \sqrt{Q}$

$$\Delta h = \left((1 - \beta) \cdot \frac{1,5 \cdot w_0 \cdot d}{u_h} + \beta \cdot \frac{K_s \cdot A \cdot Q^B}{u_h} \right) \cdot \left(\frac{x}{K_m \cdot \sqrt{Q}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (49)$$

pro $x \geq K_m \cdot \sqrt{Q}$

$$\Delta h = \left((1 - \beta) \cdot \frac{1,5 \cdot w_0 \cdot d}{u_h} + \beta \cdot \frac{K_s \cdot A \cdot Q^B}{u_h} \right) \quad (50)$$

K_m koeficient pro postupný vznos vlečky u zdroje

β hodnota závislá na teplotě spalin

Q tepelná vydatnost zdroje [MW]

w_0 výstupní rychlost spalin [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

d vnitřní průměr výduchu nebo komína [m]

u_h rychlost větru u vrchu výduchu nebo komína [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

K_s korekce na teplotní stabilitu atmosféry

A, B konstanty závislé na tepelné vydatnosti zdroje

Hodnoty parametrů K_m , β , K_s , A a B jsou uvedeny v tabulkách 3.1 a 3.2 ve zdroji [23].

Pro výpočet rychlosti větru u_h v efektivní výšce koruny nebo výduchu se obvykle používají třídní rychlosti, ve kterých jsou uváděny větrné růžice. Pro efektivní výšku od 10 m do 200 m:

$$u_h = u_{10} \cdot \left(\frac{h_1}{10} \right)^p \quad (51)$$

pro výšku nad 200 m:

$$u_h = u_{10} \cdot 20^p \quad (52)$$

u_{10} rychlost větru ve výšce 10m, obvykle z hodnot uvedených u větrné růžice

p hodnota závislá na třídě stability, uvedeno v tabulce 3.3 ve zdroji [23]

Pro výpočet směru větru φ_h v efektivní výšce nad 10 m je použit vztah:

$$\varphi_h = \varphi_{10} + \frac{h-10}{25} \quad (53)$$

φ_{10} směr větru ve výšce 10 m [°]

Stáčení směru větru na 100m výšky, způsobené rotací země, je zohledněno změnou azimutu větru o 4° ve směru hodinových ručiček.

Parametry σ_y a σ_z popisují rozptylové rychlosti rozšiřování vlečky spalin v závislosti na vzdálenosti x_L ve směru větru od zdroje.

$$\sigma_y = a_y \cdot x_L^{b_y} \quad (54)$$

$$\sigma_z = a_z \cdot x_L^{b_z} \quad (55)$$

Koeficienty a_y , a_z , b_y , b_z jsou závislé na třídě stability atmosféry a na požadavku výpočtu na hodinové nebo osmihodinové hodnoty imisního příspěvku. Hodnoty jsou uvedené v tabulkách 3.4a a 3.4b ve zdroji [23].

Parametr k_u ve výpočtu zohledňuje odstraňování počítaných znečišťujících látek již v průběhu pobytu v atmosféře. Jedná se o chemické procesy, často katalytické reakce, nebo fyzikální procesy – mokrou a suchou depozicí. V další tabulce jsou uvedeny koeficienty odstraňování a průměrná doba setrvání jednotlivých látek v ovzduší.

Vybraná znečišťující látka	průměrná doba setrvání v ovzduší	koeficient odstraňování k_u [s ⁻¹]
SO ₂ - oxid siřičitý NO - oxid dusnatý NO ₂ - oxid dusičitý PM ₁₀ a PM _{2,5}	6 dní	1,93·10 ⁻⁶
N ₂ O - oxid dusný CO ₂ - oxid uhličitý CO - oxid uhelnatý	2 roky	1,59·10 ⁻⁸

Tab. 4. Průměrná doba setrvání vybraných látek v ovzduší [23]

Korekční koeficient K_h ve výpočtu zohledňuje zeslabení nízkých zdrojů ve vyšších nadmořských výškách. Je určen v závislosti na rozdílu nadmořských výšek referenčního bodu a efektivní výšky zdroje h a na statistické četnosti výskytu horních hranic inverzí mezi těmito výškami. Pravděpodobnost výskytu horní hranice inverze, mezi nadmořskou výškou z a výškou hladiny 85 kPa, udává relativní kumulativní četnost $F(z)$ uvedená pro jednotlivé nadmořské výšky v tabulce 3.8 ve zdroji [23].

Výpočet korekčního koeficientu K_h :

$$\text{pro } z_r > z_z + h_1 \quad K_h = 1 - (F'(z_z + h_1) - F'(z_r)) \quad (56)$$

$$\text{pro } z_r \leq z_z + h_1 \quad K_h = 1 \quad (57)$$

$$\text{v I. a II. třídě stability} \quad F'(z) = 2,247 \cdot F(z) \quad (58)$$

ve III. třídě stability

$$\text{pro } u_{10} \leq 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad F'(z) = 1,170 \cdot F(z) \quad (59)$$

$$\text{pro } 2,5 < u_{10} < 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad F'(z) = 1,170 \cdot F(z) \cdot \left(1 - \frac{u_{10}-2,5}{5}\right) \quad (60)$$

$$\text{pro } u_{10} \geq 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad F'(z) = 0 \quad (61)$$

ve IV. třídě stability

$$F'(z) = 0 \quad (62)$$

Pro provedení výpočtu průměrných ročních imisních koncentrací je nejdříve nutné provést konstrukci podrobné větrné růžice s četností výskytu směru větru po 1°. Jako vstupní údaje je použita větrná růžice od ČHMÚ dělená podle tříd stability a rychlosti větru. Relativní četnosti jsou uvedeny v 8 směrech větru a bezvětrí ve všech pěti třídách stability. Nejprve se vypočte relativní četnosti $f_{(\varphi_s)}$ v 8 směrech a pak se provede výpočet četností f_φ v podrobné větrné růžici.

$$f_\varphi = \frac{1}{4500} \cdot \left[f(\varphi_1) + \frac{\varphi - \varphi_1}{45} \cdot (f(\varphi_2) - f(\varphi_1)) \right] \quad (63)$$

φ_1, φ_2 sousední směry větru v 8 směrové růžici

Při výpočtu relativních četností f_φ musí platit

$$\sum_j \sum_\varphi f_{\varphi_j} = 1 \quad (64)$$

Součet j je prováděn přes všechny třídy stability a v nich tříd rychlostí větrů a φ přes všechny azimuty od 0° do 359°.

Dále je určeno tzv. relativní roční využití emisního zdroje v maximálním výkonu α .

$$\alpha = \frac{P_r}{8760} \quad (65)$$

P_r roční provozní doba [hod]

U zdrojů se sezónními změnami výkonu se k výpočtu α použije množství paliva spáleného za hodinu S_h a za rok S_r .

$$\alpha = \frac{S_r}{8760 \cdot S_h} \quad (66)$$

S_h množství spáleného paliva za hodinu [$\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$; $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$]

S_r množství spáleného paliva za rok [$\text{kg} \cdot \text{r}^{-1}$; $\text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$]

Roční průměrná koncentrace od i -tého zdroje, při vypočtené hodinové imisní koncentraci $c_{i\varphi_j}$ ve směru větru φ , rozptylových podmínkách j a při ročním využití α spočítáme v daném referenčním bodě dle rovnice:

$$\bar{c} = \sum_j \sum_\varphi (f_{\varphi_j} \cdot \sum_i \alpha_i \cdot c_{i\varphi_j}) \quad (67)$$

2.5 Metody sledování emisí těžkých kovů pomocí biomonitoringu

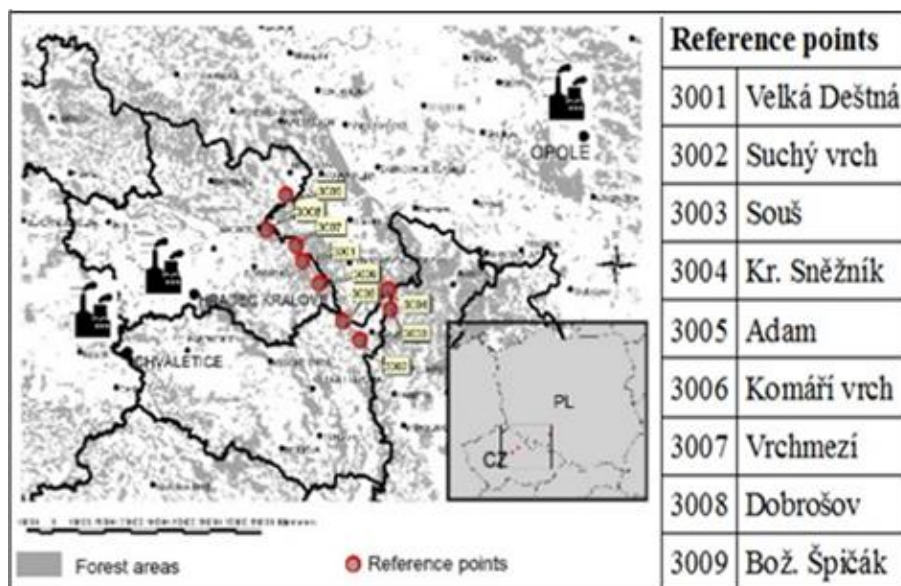
Přeshraniční rekreační česko-polskou oblast Královéhradeckého a Opolského kraje s několika národními parky zasahují emise ze tří velkých elektráren spalujících uhlí. Jsou to elektrárna ve Chvaleticích, elektrárna v Opatovicích nad Labem a částečně i elektrárna v Opole. V minulosti emise z velkých uhelných elektráren představovaly na tomto území mimořádně velkou ekologickou zátěž. S tím souvisí i zvýšená pozornost věnovaná kontinuálnímu monitoringu emisí. Hustá síť stanic automatického imisního monitoringu nepřetržitě monitoruje imise v dané oblasti. Výše příspěvků těchto velkých zdrojů k celkovým imisím je dlouhodobě sledována pomocí výpočtů rozptylu kouřových vleček těchto zdrojů. V České republice jsou od r. 1998 zavedeny pro velké zdroje emisí povinné výpočty znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů SYMOS 97, „Systém modelování stacionárních zdrojů“, viz kap. 2.4.

V celé této oblasti probíhá od r. 2002 za účasti pracovníků a studentů ze dvou přeshraničně sousedících vysokých škol, Přírodovědno-technické fakulty Univerzity Opole a Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové, systematický dlouhodobý výzkum imisí toxických kovů za pomoci bioindikátorů, podporovaný EU v rámci pěti na sebe navazujících polsko-českých projektů. Jako bioindikátory jsou využívány lišejníky *Hypogymnia physodes*, mechy *Pleurozium schreberi* a hřibovité houby *Boletus badius*, při současných odběrech vzorků svrchní vrstvy půdy z místa růstu daného bioindikátoru.

K určení polohy odebraného vzorku jsou využívány ruční mapové přístroje s vestavěným barovýškoměrem a elektromagnetickým kompasem pro terénní mapování. Místa odběrů byla vytyčena a jejich GPS zaměření určena již v rámci předchozích grantových projektů.

Stanovení těžkých kovů v bioindikátorech a půdách je prováděno ve firmě EMPLA Hradec Králové a v laboratořích fyzikálně-chemického výzkumu na WPT UO a ve spolupracujících firmách v Opole. Ke stanovením jsou využívány mikrovlnné mineralizační systémy a atomové absorpční spektrometry jak s plamenovou ionisací, tak i s termickou atomisací a analyzátoři rtuti AMA 254 české výroby. Podrobnosti měření i vyhodnocování datových souborů jsou uvedeny v článcích [25], [26], [28] a impaktovaných publikacích [27], [29] a [30 - spoluautorství].

Tyto výsledky potvrzují, že hodnoty koncentrací těžkých kovů v této přeshraniční rekreačně využívané česko-polské oblasti vykazují, po zavedení moderních metod odsiřování a odprašování spalin v obou našich uhelných elektrárnách, trvale snižující tendenci.



Obr. 7. Mapa sledovaných referenčních bodů [30]



Obr. 8. Dosah modelace Symos '97 pro elektrárny v pohraničí [30]

3 Úkoly a cíle diplomové práce

V oblasti česko-polského pohraničí jsou na české straně dva významní producenti emisí, elektrárna Opatovice (EOP) a elektrárna Chvaletice (7EC). Od roku 2021 budou platit v rámci EU nové a podstatně přísnější limity pro emise z uhelných elektráren, pro jejichž dodržení jsou nutné značné investice.

Úkolem práce je proto přispět k lepšímu objasnění fyzikálních principů a matematického zpracování této problematiky.

Z dostupných zahraničních studií, které byly vypracovány na základě dlouhodobého výzkumu spalovacích procesů v uhelných elektrárnách je zřejmé, že toxické kovy se koncentrují ve frakcích spalovacího procesu, tj. v ložovém popelu, v úletovém popílku, v plynném aerosolu či v plynných emisích odlišným způsobem.

Některé studie rovněž upozorňují na vysoké nejistoty měření zejména při získávání spolehlivých a přesných dat při kontinuálních měřeních emisí, zejména však při měření plynných emisí těchto látek. Je proto třeba souborně zpracovat problematiku technologií snižování emisí, kontinuálních měření a matematického modelování distribuce těžkých kovů uvolňovaných při spalování černého a hnědého uhlí.

Cílem práce je zpracování problematiky fyzikálních principů fungování elektrostatických odlučovačů a tkaninových filtrů, které jsou schopny obstát při velmi přísných omezeních regulujících úniky pevných emisí z uhelných elektráren do atmosféry, statistické vyhodnocení datových souborů kontinuálních měření emisí a zpracování modelů distribuce těžkých kovů Hg, As, Cd a Pb na mapových podkladech uvolňovaných při spalování hnědého uhlí v obou elektrárnách v dlouhodobě sledovaných dvanácti referenčních bodech česko-polské přeshraniční oblasti.

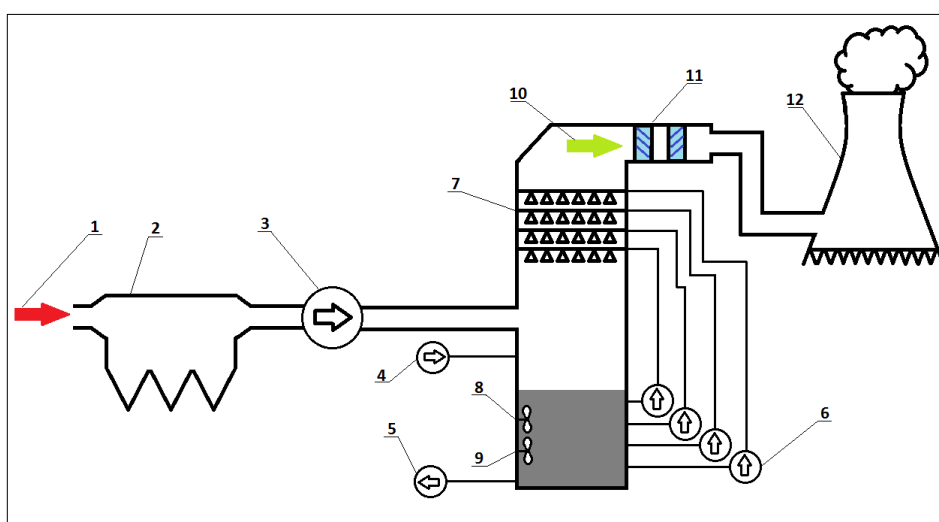
4 Praktická část

4.1 Popis procesů čištění spalin

4.1.1 Procesy odsiřování spalin

Technologie odsíření kouřových plynů (ODS) v 7EC se skládá ze dvou absorbérů a pomocných systémů. Každý absorbér stojí v samostatné budově a je určen pro dva výrobní bloky. Pomocné systémy pro provoz odsíření jsou společné pro obě linky ODS, jedná se o dopravu, skladování, mletí a přípravu vápencové suspenze a o odvodnění sádrovce. Tyto provozy jsou v samostatných budovách.

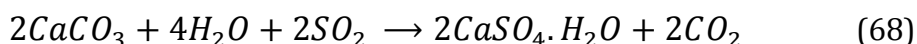
Spaliny jsou přivedeny kouřovody od čtyř bloků do dvou protiproudých absorbérů pomocí kouřových ventilátorů, které se nacházejí za elektrostatickými odlučovači. Kouřovody jsou navrženy tak, aby bylo možné zvolit, kterou linkou ODS budou bloky odsiřovány.



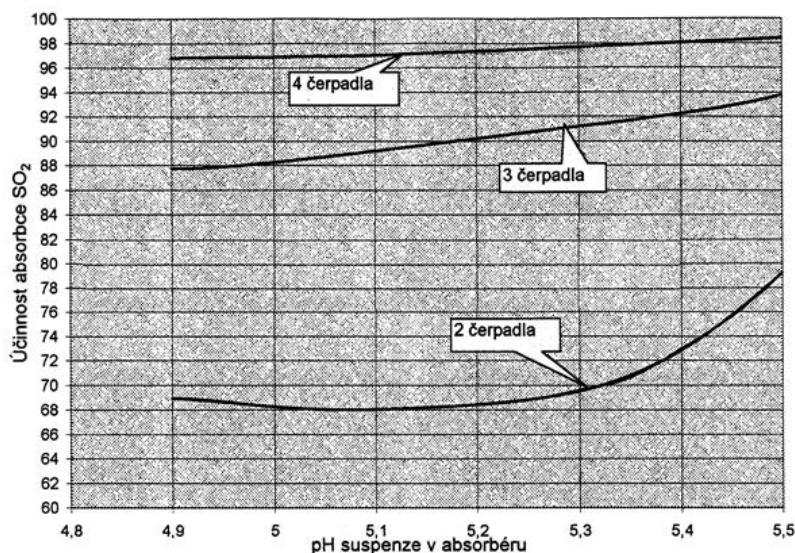
Obr. 9. Schéma odsíření v 7EC [obr. vlastní]

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. Vstup spalin od kotle | 7. Sprchová patra s tryskami |
| 2. Elektrostatický odlučovač | 8. Oxidační míchadla |
| 3. Kouřový ventilátor | 9. Mechanická míchadla |
| 4. Čerpadlo vápencové suspenze | 10. Odsířené spaliny |
| 5. Odtahové čerpadlo sádrovce | 11. I. a II. odlučovač kapek |
| 6. Cirkulační čerpadla | 12. Chladící věž |

Absorbér je stojatá nádoba válcového tvaru o průměru 15,44 m a výšce 31,52 m. Je vyrobena z ocele a uvnitř chráněna antikoročním nátěrem. Část pláště ve výšce 16,5 až 20,5m je vyložena nerezovým materiálem v oblasti sprchových pater. Do absorbéru jsou spaliny přivedeny přes vstupní nerezové hrdlo nad suspenzí ve spodní části nádoby s výškou hladiny 9,8m. Aby nedocházelo k zatuhnutí suspenze, jsou po obvodu nádoby ve výšce 0,9m instalována 3 mechanická a ve výšce 4,4m 8 oxidačních míchadel, která zároveň zajišťují dostatečný přísun vzduchu pro chemické reakce v absorbéru. Suspenze je čerpána čtyřmi cirkulačními čerpadly do sprchových pater s rozstříkovacími tryskami v protisměru toku spalin do výšky od 18 do 22,5m s roztečí 1,5 m. V absorbéru dochází k chemickým reakcím odstraňujícím oxidy síry z kouřových plynů:



Účinnost celého procesu je dána počtem cirkulačních čerpadel v chodu a hodnotou pH, která zároveň slouží jako vstupní hodnota pro regulaci dávkování vápencové suspenze – její koncentraci a množství.



Graf 2. Závislost účinnosti odsíření, upraveno podle [30]

V případě že hustota suspenze v absorbéru dosáhne předepsané hodnoty (V 7EC 1143kg·m⁻³) je přibližně polovina odčerpána do nádrže sádrovcové suspenze odtahovým čerpadlem k dalšímu zpracování.

Po průchodu sprchovými zónami odsířené spaliny vstupují do dvojstupňového vislého odlučovače kapek, kde dochází k odloučení zbytků vody. Protože vodní kapky ve sprchové zóně zachytávají neodloučené částice TZL, funguje odsiřovací linka zároveň jako další filtr prachových částic s účinností až 90%.



Obr. 10. Odlučovač kapek absorbérů [foto vlastní]

Vyčištěné kouřové plyny jsou nakonec vypouštěny do ovzduší přes 100 metrové chladicí věže elektrárny [30].



Obr. 11. Pohled ze střechy kotelny na chladicí věže, v průhledu jsou budovy absorbérů odsiřovacích linek [foto vlastní]

Následující tabulka uvádí typické parametry pro jeden absorbér v 7EC:

Veličina - jednotka	Minimum 56,40 %	Jmenovité 100 %	Maximum 110 %
Objemový průtok vlhkých spalin (Nm ³ ·h ⁻¹)	583 200	2 066 400	2 273 040
	(1 x 583 200)	(2 x 1 033 200)	(2 x 1 136 520)
Teplota spalin (°C)	140	160	200
Obsah popílku (mg·Nm ⁻³)		100	200
H ₂ O obsah (%)		12,3	
koncentrace SO ₂ ve vlhkých spalinách (mg·Nm ⁻³)	3 369	4 840	7 000
koncentrace SO ₂ v suchých spalinách (mg·Nm ⁻³)	4035	5796	8383

Tab. 5. Parametry absorbéru odsíření [30]

4.1.2 Procesy odstraňování tuhých znečišťujících látek

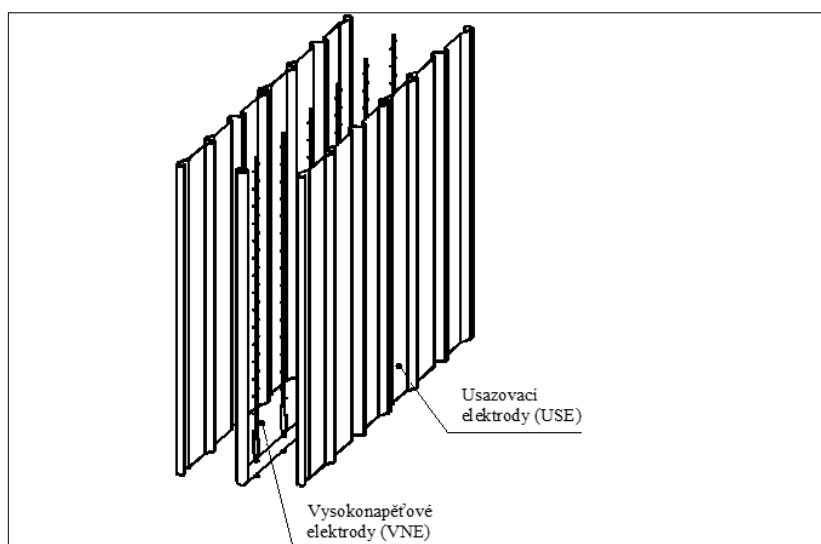
4.1.2.1 Popis elektrostatických odlučovačů

Elektrostatické odlučovače (EO) instalované v elektrárně Chvaletice jsou výrobek firmy ZVVZ Milevsko licencované od firmy Lurgi. EO tvoří část kouřovodů jednotlivých bloků mezi výstupem ze zadního tahu kotle a kouřovým ventilátorem. Spaliny vstupují přes rozdělovací stěnu do EO, kde procházejí podél vysokonapěťových a usazovacích elektrod. Popílek se u vysokonapěťových elektrod nabíjí a je zachytáván na elektrodách usazovacích. Poté je mechanicky oklepáván do výsypek ve spodní části filtru a pneumatickou dopravou transportován k dalšímu zpracování [31].



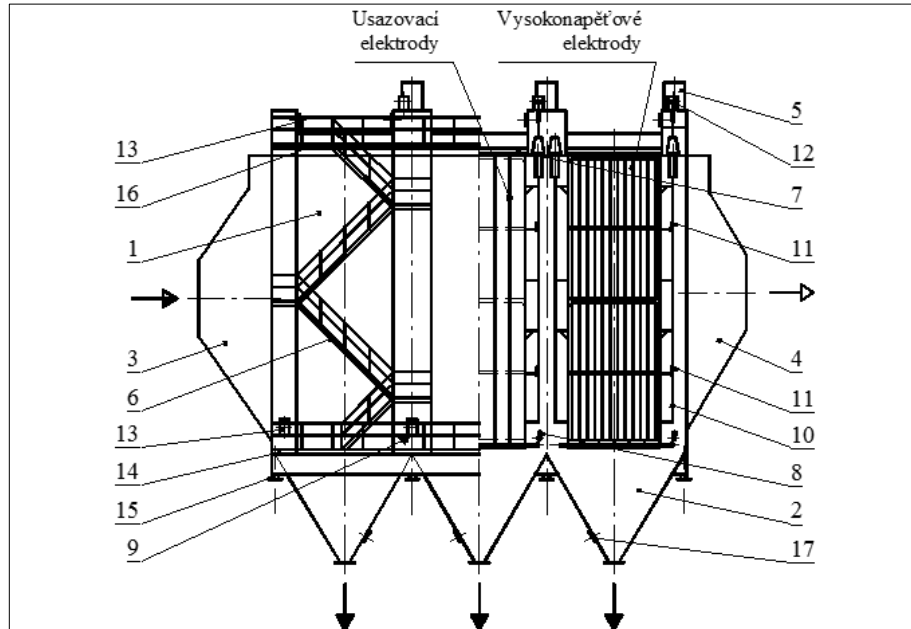
Obr. 12. Elektrostatické odlučovače v 7EC [foto vlastní]

Mechanickou část elektrofiltru tvoří ocelové skříně stavebnicové konstrukce ve kterých je zavěšena soustava elektrod a oklepávacích mechanismů. EO pro jeden kotel tvoří dvě paralelní větve, každá se třemi sekcemi, z nichž každá má samostatné napájení. Rozměry aktivní zóny odlučovače jsou 14,64 m na délku a 10,50 m na výšku. Usazovací elektrody o délce 10,95 m jsou tvořeny řadami profilovaných ocelových pásů, zavěšených souběžně se směrem toku spalin. Každá řada je pohyblivě zavěšena a uzemněna. Na spodní vyztužené části usazovacích elektrod je uchycena oklepávací tyč, která má na výstupní části tvar kovadlinky pro kladiva oklepů. V každé sekci je 56 usazovacích elektrod a jejich celková aktivní plocha ve všech sekcích je 26 400m².



Obr. 13. Znázornění elektrod [32]

Vysokonapětové elektrody (VNE) jsou v aktivní zóně umístěny v řadách mezi usazovacími elektrodami. Pomocí příčného nosného rámu jsou zavěšeny na keramických izolátorech umístěných ve střeše EO. Elektrody jsou vyrobené z ocelového pásu se sršícími hroty. Také tyto elektrody jsou pravidelně oklepávány kladivy do nárazníků připevněných na rámech. Celkem v jedné sekci je 55 rámu se 147 elektrodami [21].



Obr. 14. Průřez elektrostatickými odlučovači [32]

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Skříň odlučovače | 10. VNE – zavěšení |
| 2. Výsypka | 11. Oklepávací mechanismus VNE |
| 3. Vstupní díl | 12. Poháněcí jednotka oklepávání VNE |
| 4. Výstupní díl | 13. Dvířka |
| 5. Usměrňovač | 14. Spodní obsluhovací plošina |
| 6. Schody | 15. Nosné ložisko |
| 7. USE – zavěšení | 16. Horní obsluhovací plošina |
| 8. Oklepávací mechanismus USE | 17. Kontrolní otvor |
| 9. Poháněcí jednotka oklepávání USE | |



Obr. 15. Oklepy elektrod [foto vlastní]

Každá sekce má vlastní napájecí zdroj pro vysokonapěťové elektrody, takže na jednom bloku je 12 usměrňovacích jednotek TUR 55kV/800mA. Tyto jednotky jsou provedeny jako jednofázové s tyristorovými regulačními orgány.

Parametry usměrňovačů:

Typ	TUR 55/800
Jmenovité vstupní napětí U	0,4 kV
Jmenovitý primární proud I	200 A
Jmenovité výstupní napětí U	60 kV
Jmenovitý výstupní proud I	800 mA
Připojovací výkon	76 000 VA
Kmitočet	50 Hz

Tab. 6. Parametry usměrňovačů EO v 7EC [32]

Před každou jednotkou je předřazen řídicí regulátor EDYN 92 jehož úkolem je nastavení maximální intenzity elektrostatického pole mezi elektrodami pro nejvyšší možné nabití prachových částic aniž by docházelo k nežádoucím přeskokům. Regulátor pracuje pouze s hodnotami napětí a proudu a to mu umožňuje pracovat i bez nadřazeného řídicího systému. V krátké vzdálenosti od vysokonapěťového kabelu je připojen tlumící odpor a tlumivka pro potlačení nechtěných oscilací na VVN spojovacím vedení s následným ohrožením správné funkce EO [31].

Parametry elektrostatického odlučovače:

Výrobce	ZVVZ Milevsko
Počet kusů na blok	2
Počet sekcí jednoho odlučovače	3
Počet sekcí za sebou	3
Vzdálenost VVN a usazovacích elektrod	0,15 ± 0,005 m
Maximální množství spalin na výstupu z kotle	290 N·m ³ ·s ⁻¹
Maximální vstupní koncentrace prachu	50 g·m ⁻³
Minimální obsah CO ₂ v kouřových plynech	13%
Výstupní rychlost spalin z komína (provoz na komín)	28 m·s ⁻¹

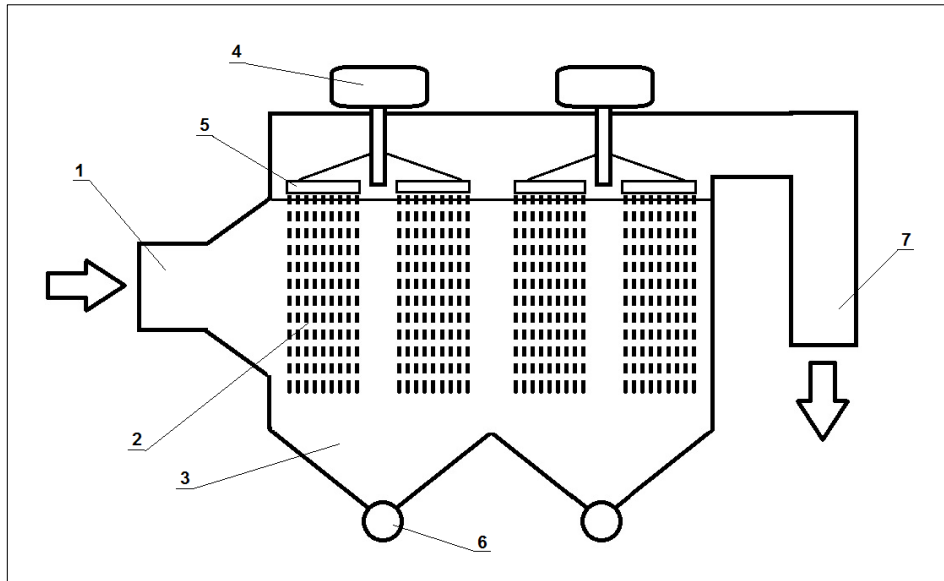
Tab. 7. Garantované parametry EO v 7EC [31]

4.1.2.2 Popis tkaninových filtrů

V Elektrárně Opatovice je na čtyřech blocích k odstranění TZL ze spalin používána technologie nízkotlakých, vysoko objemových látkových filtrů s pulsní regenerací, s garantovanou maximální hodnotou emisí TZL 10mg·m⁻³ od firmy Hamon Research-Cottrell GmbH.

Při průchodu spalin přes filtry dochází k zachytávání prachových částic na tkaninovém filtru a vyčištěné spaliny pak pokračují přes kouřový ventilátor do odsířovací linky. Zachycené částice opadávají do výsypek ve spodní části filtru a jsou pneumatickou dopravou transportovány k dalšímu zpracování.

Na každém bloku jsou nainstalovány 2 látkové filtry, každý filtr se skládá ze 4 svazků a každý obsahuje 520 filtračních rukávů. Dohromady na bloku je jich tedy 4 160. Každý svazek má kruhový tvar a navrchu je zakončen trubkovnicí do které jsou zasunuty filtrační rukávy. Nad trubkovnicí je sestava otočného rozdělovače s tryskami pro zpětný proplach rukávů čistícím vzduchem.



Obr. 16. Schéma tkaninových filtrů [obr. vlastní]

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Vstup spalin | 5. Pulsní trysky čistícího vzduchu |
| 2. Tkaninové rukávy | 6. Pneumatická doprava popílku |
| 3. Výsypka | 7. Výstup odprášených spalin |
| 4. Zásobník čistícího vzduchu | |

Rukávy jsou vyrobeny z vpichované PTFE plsti na netkaném laminovaném materiálu. Každý rukáv tvoří obdélník se zaoblenými konci o rozměrech 8 x 0,125 m s filtrační plochou 3,12 m² a je do něj zasunuta kovová konstrukce pro udržení tvaru filtrační tkaniny a zefektivnění jejího čištění.



Obr. 17. Konstrukce rukávu [28]

Čištění rukávů probíhá pomocí pulsního vyfouknutí velkého objemu vzduchu do otevřených konců rukávů. Dochází tak nejen k nafouknutí tkaniny, a v důsledku toho k shození popílkového nánosu do výsypek, ale i k zpětnému profouknutí a jejímu efektivnějšímu vyčištění [33].

Technické parametry filtrů:

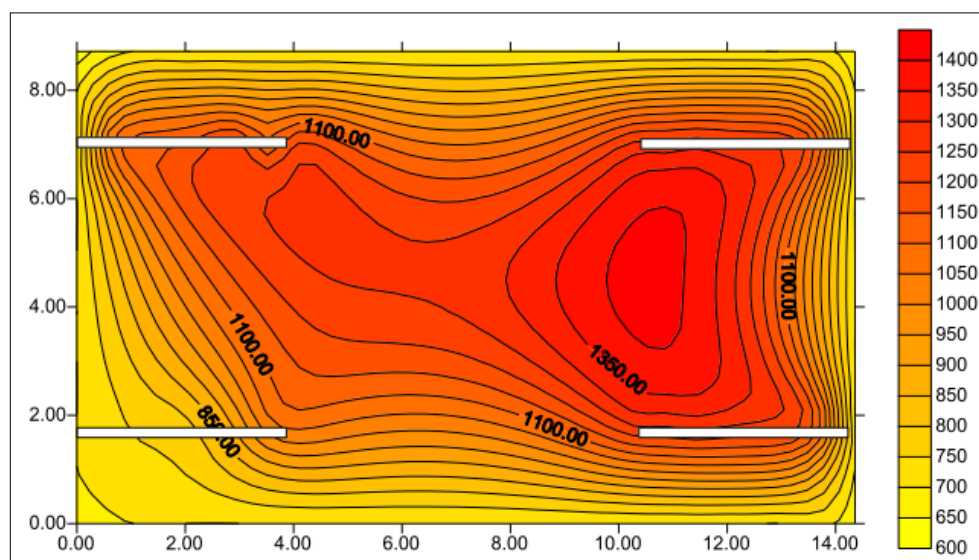
Filtrační plocha na jeden kotel	12 975 m ²
Tok spalin na jeden filtr	786 395 m ³ ·hod ⁻¹
Počet pulsů čistícího vzduchu	150 hod ⁻¹
Maximální průtok čistícího vzduchu	2 580 m ³ ·hod ⁻¹
Provozní teplota spalin	160 – 180 °C
Garantovaný maximální úlet TZL	10 mg·m ⁻³

Tab. 8. Parametry tkaninových filtrů v elektrárně Opatovice [28]

4.1.3 Procesy snížení NO_x metodou SNCR

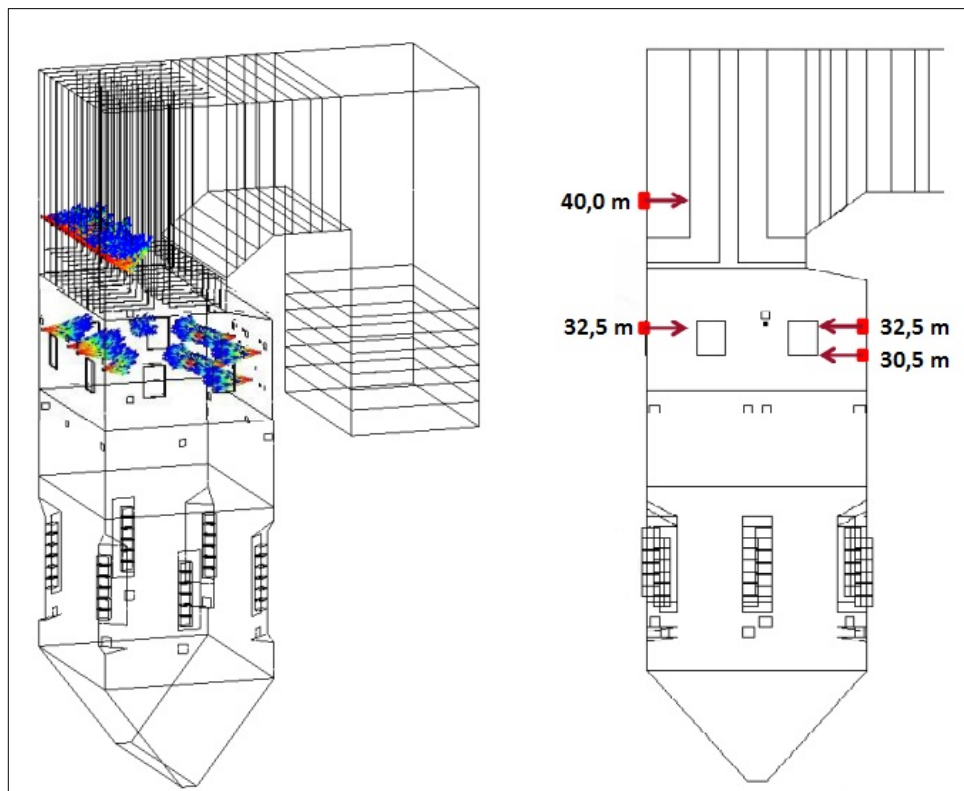
Jako sekundární opatření pro snížení úletu NO_x v 7EC je použit systém RRmix který je založen na principu selektivní nekatalytické redukce (SNCR). Při tomto principu se vstřikuje roztok o regulované koncentraci přímo do spalovací komory do míst s odpovídající teplotou pro průběh chemických reakcí snižující obsah NO_x s následnou tvorbou volných molekul N₂.

Pro určení místa instalace vstřikovacích trysek bylo provedeno měření teplotních polí při různých výkonových hladinách a pro různé konfigurace provozu šesti práškových hořáků. Následující obrázek ukazuje rozložení teplotního pole v kotli ve výšce 38m a výkonu bloku 200MW, bílé obdélníky zobrazují rozsah měřících sond:



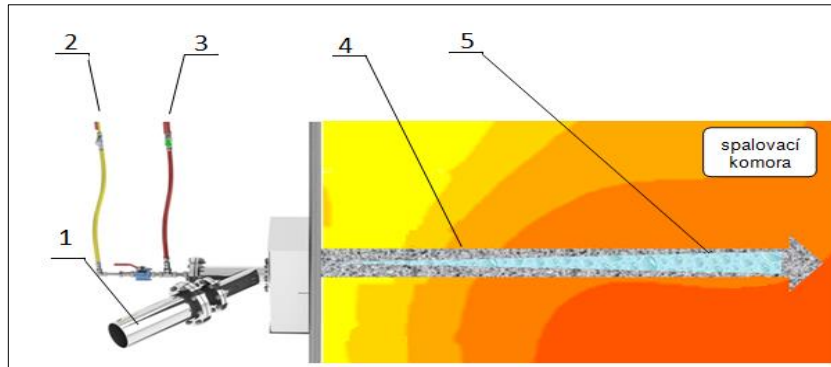
Obr. 18. Měření teplotních polí na kotli č. 3 prováděné firmou HTV-NERGIA v roce 2015 [34]

Na základě provedeného měření byly trysky vstřiku močoviny umístěny na kótách 30,5 m 4 trysky, 32,5 m 8 trysek a 40 m 10 trysek, celkem tedy 22 vstřikových kopí.



Obr. 19. Vizualizace SNCR vstřiků, upraveno dle [34]

Celý proces SNCR začíná přípravou roztoku močoviny na kótě 38,0 m mezi dvěma kotli, kde se nachází dvě 3m³ nádrže demineralizované vody a 40% roztoku močoviny. Pomocí regulovaných čerpadel a statického míchadla se zde provádí příprava vstřikovaného média o koncentraci 5 až 15%, a po té je připravený roztok distribuován k jednotlivým vstřikovacím kopím systému RRmix, který zaručuje rozprášení reagentu v příslušné části kotle [35], [36].

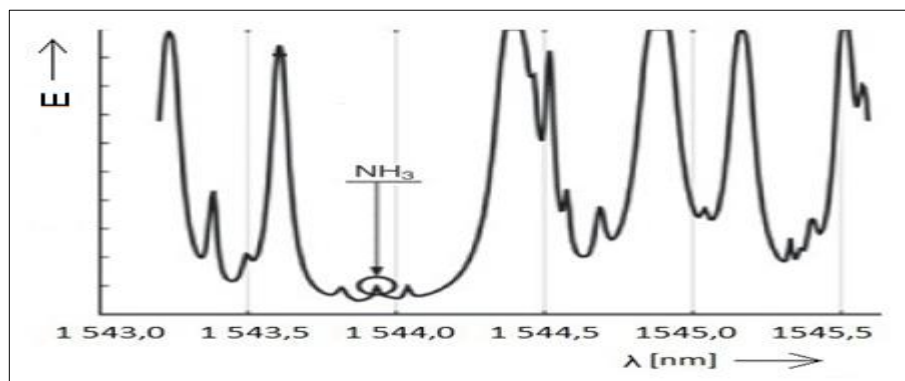


Obr. 20. Vstřikovací kopí SNCR [31]

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1. Vzduchové potrubí RRMix | 4. Proud vzduchu RRMix |
| 2. Potrubí vstřikování močoviny | 5. Proud močoviny |
| 3. Potrubí pracovního vzduchu | |

Na konci celého procesu je měření čpavkového skluzu umístěného na kouřovodech kole před elektrostatickými odlučovači. Měření NH_3 je na každém kotli prováděno dvěma analyzátoři in-situ od firmy SICK, typ GM700 pracujících na principu prozařování testovaného plynu laserovou diodou s následnou detekcí pohlceného záření sledovaného plynu fotodiodou [38]. Naměřená hodnota čpavkového skluzu nesmí přesáhnout hodnotu $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, při vyšších hodnotách dochází znečištění popelu amonnými sloučeninami, zvýšenému výskytu koroze a znečištění na částech kotle v cestě spalin.

Následující graf ukazuje absorpční křivku s vyznačenou vlnovou délkou odpovídající molekule NH_3 :



Graf 3. Absorpční křivka tzv. čpavkového skluzu, upraveno dle [37]

Řídicí systém SNCR vyhodnocuje výkon bloku, požadované množství NO_x v rozsahu 150 až 250 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, provozované práškové hořáky a hodnotu čpavkového skluzu. Dle těchto údajů nastavuje koncentraci a množství reagentu, otvírání ventilů trysek v jednotlivých úrovních a jejich počet.

Nejdůležitější zpětnou vazbu o správné funkci technologie nám podává měření NO_x a čpavkový skluz [35], [36].

Technická specifikace dle dodavatele:

Výchozí hodnota NO_x	355 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Garantovaná výstupní hodnota NO_x	260 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Maximální skluz NH_3 ve spalínách	5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Maximální množství NH_3 v popílků	100 ppm
Spotřeba reagentu pro redukci z 355 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ na 260 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0,68 $\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ u 40% roztoku NH_3

Tab. 9. Specifikace technologie SNCR v 7EC [36]



Obr. 21. Vstříky na kótě 40,0m [foto vlastní]

4.2 Technika kontinuálních měření

4.2.1 Kontinuální měření emisí oxidů síry a dusíku

V 7EC je měření plyných znečišťujících látek prováděno na každém bloku a u každého absorbéru odsiřovací linky in-situ emisními stanicemi ABB AO2000. Jeden odběr měření je prováděn za elektrostatickými odlučovači a na připojené stanici jsou sledovány hodnoty NO_x , SO_2 , CO , CO_2 a O_2 . Druhá stanice je připojena na dvě odběrná místa, první před vstupem spalin do odsiřovací linky, kde se měří SO_2 a O_2 a druhý odběr je na výstupu do chladících věží. Zde stanice vyhodnocuje také NO_x , SO_2 , CO , CO_2 a O_2 , tyto výsledky jsou následně zpracovány pro výkazy dle platné legislativy.

V odběrném místě jsou nasávány spaliny vyhřívanou sondou pomocí čerpadla, které je umístěno ve stanici, a následně přivedeno vyhříváním potrubím do měřicí stanice. U odběru za linkou odsíření musí být ještě umístěn odlučovač vody – spaliny procházejí technologií mokré vypírky a i po průchodu odlučovačem kapek mají vyšší vlhkost. Sonda i potrubí musí být otápěné na teplotu odebíraných spalin, aby nedocházelo k ochlazení plynů s následnou kondenzací vody v příváděcím potrubí. Teplota plynů odebíraných za elektrostatickými odlučovači je 150°C a za odsiřovací linkou 70°C .



Obr. 22. Odběr PZL za ODS [foto vlastní]

Ve stanici jsou spaliny přivedeny k předchladiči s kondenzační odváděcí nádobou, dále procházejí přes dva třicestné ventily, které slouží k nulování a kalibraci přístroje, pokračují přes vymrazovací sušič plynů pro získání suchého vzorku. Následně proudí přes filtr pro odstranění zbylých tuhých látek.

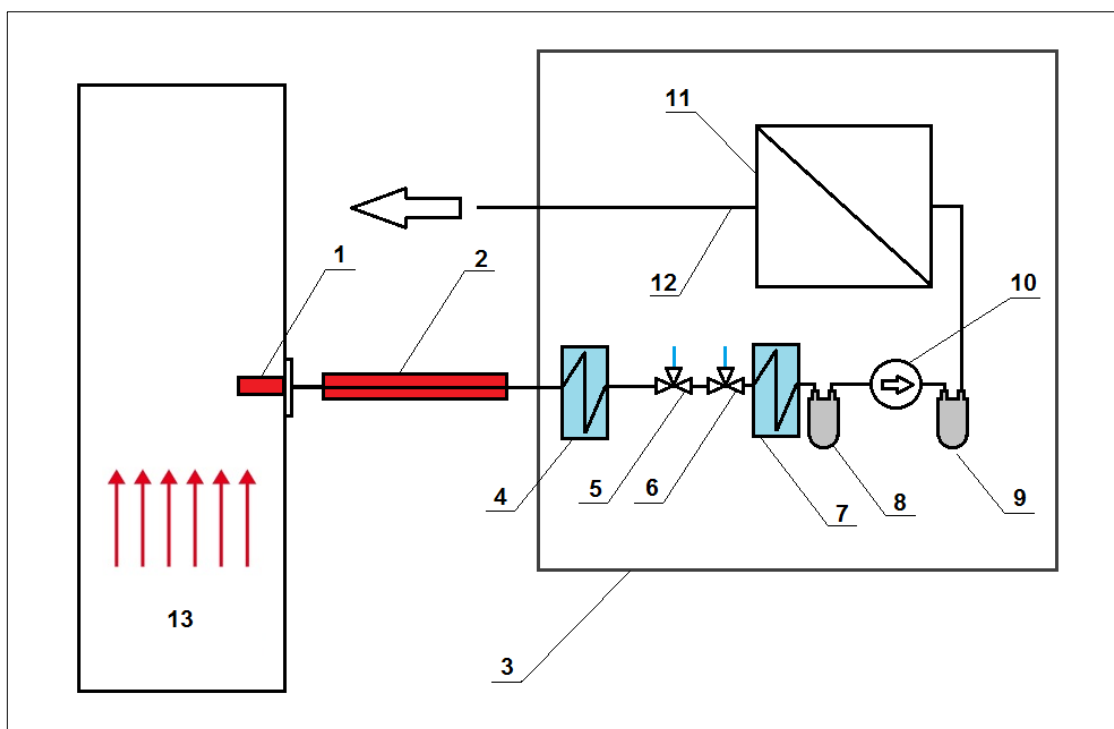
U měření za odlučovači a před odsířením je z důvodu vyšších TZL ještě předřazen jeden keramický filtr přímo za odběrovou sondou, u měření za odsířením je přidán kyselinový filtr, aby nedošlo ke zničení měřících přístrojů.

Nakonec je vzorek po průchodu přes poslední odlučovač kondenzátu přiveden do analyzátoru s měřícími celami.



Obr. 13. Měřící stanice ABB u ODS [foto vlastní]

Měření probíhá na principu sledování míry pohlcené vlnové délky charakteristické pro měřenou látku. Pro měření SO_2 a NO je používána vlnová délka v rozsahu 218 až 233 nm.



Obr. 24. Schéma ABB AO 2000 [schéma vlastní]

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. Vyhřívaná odběrová sonda | 8. Kyselinový filtr |
| 2. Otápěné přívodní potrubí | 9. Prachový filtr |
| 3. Měřicí stanice | 10. Čerpadlo |
| 4. Předchladič | 11. Analyzátor s měřícími celami |
| 5. Ventil pro kalibrační plyn | 12. Výstup vzorku |
| 6. Ventil pro nulový plyn | 13. Kouřovod |
| 7. Vymrazovací sušič | |

Kontrola měřicí stanice se provádí každých týden kalibrací nulového bodu a přesnosti měření. Při kontrole nulového bodu se přepne trojcestný ventil a do měřících cel přivede referenční nulový plyn, buď N_2 nebo suchý vzduch neobsahující měřenou složku. Po té se provede kontrola měření pomocí plynu s certifikované lahve. Dále jednou ročně je prováděno porovnání s certifikovaným přístrojem a jednou za dva roky kontrola gravimetrickou metodou.

4.2.1.1 Kalibrační metody pro kontinuální měření emisí SO₂ a NO_x

Kalibrační měření je prováděno jednou za týden, kdy dochází pouze ke kontrole naměřené hodnoty na referenčním plynu, u kterého je známa koncentrace, a nulového bodu. Jednou ročně je kalibrační měření realizováno dle normy ČSN EN 14 181 Stacionární zdroje emisí - Prokazování jakosti automatizovaných měřících systémů. Měření je prováděno pomocí kontinuálních přístrojů, umístěných v měřícím voze od výrobce HORIBA. Metoda měření koncentrace SO₂ je založeno na principu absorpce elektromagnetického záření o vlnové délce odpovídající měřenému plynu.

Měření koncentrace NO_x využívá chemiluminiscence.

Měření je prováděno souběžně s kontrolovanou stanicí, hodnoty k porovnání jsou získávány ze záznamových systémů.

Výsledkem je ověření korektnosti nastavení kalibračních křivek a tím správných výsledků kontinuálního měření.

Při měření se provádí test variability měřícího systému, zkouška platnosti a test linearity kalibrační funkce a nakonec kontrola driftu nulového bodu a rozpětí měření.

Pro výpočet variability je použit vztah:

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (D_i - D_{prům})^2} \quad (69)$$

S_D směrodatná odchylka rozdílů D_i výsledků souběžného měření

N počet párových měření

D_i rozdíl mezi naměřenými hodnotami v jednom měření

$D_{prům}$ průměrná hodnota D_i

Test variability je úspěšný pokud:

$$S_D \leq 1,5 \cdot \sigma_o \cdot k_v \quad (70)$$

σ_o nejistota odvozená z legislativních požadavků

k_v zkušební hodnota pro zjištění variability

Hodnotu σ_o získáme ze vztahu:

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} \quad (71)$$

p procentuální podíl

E hodnota emisního limitu

Pro ověření kalibrační funkce musí platit:

$$|D_{prům}| \leq t_{0,95}(N - 1) \cdot \left(\frac{S_D}{\sqrt{N}}\right) + \sigma_o \quad (72)$$

$D_{prům}$ průměrná hodnota D_i

$t_{0,95}$ hodnota Studentova rozdělení

N počet párových výsledků při souběžném měření

Při testu linearit kalibrační funkce se provádí kontrola výsledků měření plynu s koncentrací od 0 % do 80 % měřeného plynu.

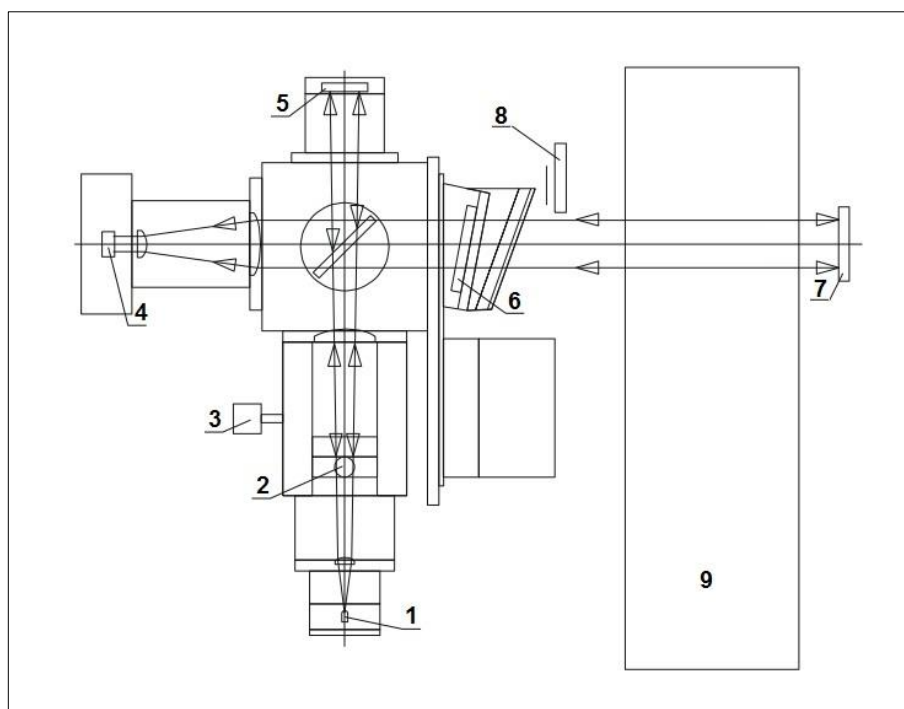
Při kontrole driftu nulového bodu se provádí ověření měřených hodnot při průchodu nulového referenčního plynu stanicí. Totéž platí pro rozpětí.

Pouze v případě ověření uvedených podmínek je schváleno další provozování měřící stanice dle ČSN EN 14 181.

4.2.2 Kontinuální měření emisí tuhých znečišťujících látek

Měření TZL v 7EC na spalinách je prováděno také na dvou místech. První měření se provádí za elektrostatickými odlučovači pro informaci o stavu a účinnosti odlučovačů, kdy pro bloky 1 a 2 je prováděno měření pro každý kouřovod zvlášť, takže dvě měření, a pro bloky 3 a 4 je pouze jedno měření za spojením kouřovodů před kouřovým ventilátorem. Druhé měření je opět za odsiřovací linkou pro výkazy a protokoly pro MŽP ČR.

Měření za elektrostatickými odlučovači je realizováno přístrojem DR-290 od firmy DURAG s maximální hodnotou TZL 4000 mg·m⁻³. Přístroj pracuje na principu dvojité propustnosti, kdy pulsní měřící paprsek s vlnovou délkou 500 až 600 nm prochází měřeným kanálem na protilehlou stěnu, kde je umístěn odrazový reflektor, a vrací se zpět přes polopropustné zrcadlo na fotodiodu. Řídící jednotka po té změří úbytek intenzity paprsku způsobeného rozptylem na prachových částicích a převede tuto hodnotu na elektrickou veličinu.

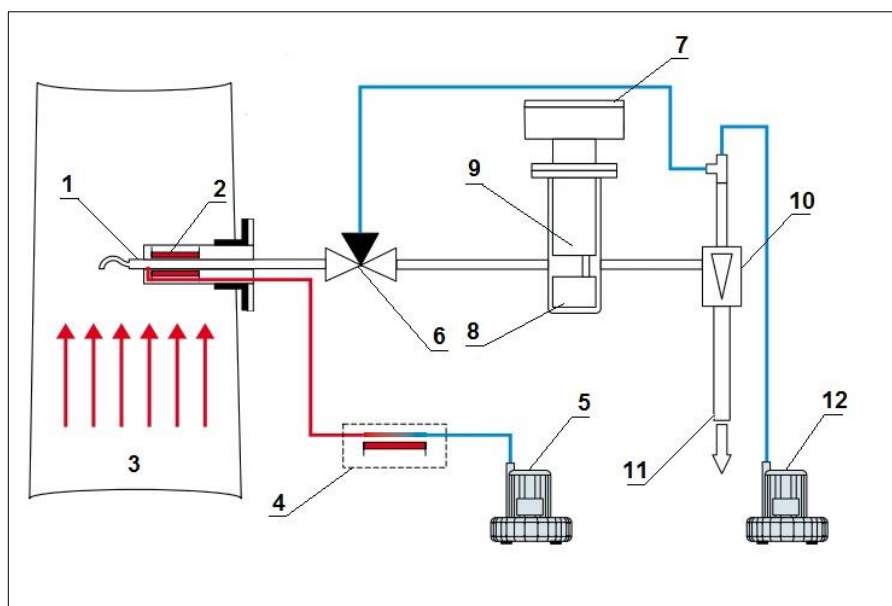


Obr. 25. Schéma přístroje Durag 290 [39]

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. Laserová dioda | 6. Vyhřívání |
| 2. Optické nastavení | 7. Reflektor |
| 3. Zaostřování | 8. Nulovací zrcadlo |
| 4. Fotodioda | 9. Kouřovod |
| 5. Srovnávací optika | |

Aby nedocházelo k zanášení optiky, která je ve stěnách kouřovodu, je k ní zaveden ofukovací vzduch s nepřetržitým provozem. Pro kalibraci slouží nulovací zrcadlo uvnitř přístroje, po jeho vysunutí musí být naměřeny nulové množství TZL, dále je jednou za rok provedeno porovnání hodnot s kontrolním měřením a jednou za dva roky provedena gravimetrická kalibrace.

Protože odsířené spaliny procházejí mokrou vápencovou vypírkou, musí být měření TZL za odsiřovací linkou prováděno přístrojem, který dokáže analyzovat vzorky až se 100 % vlhkostí. V 7EC je legislativní měření TZL prováděno přístroji DURAG DR 820-F s maximální hodnotou TZL $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Přístroj odebírá vzorek přímo z toku spalin pomocí ředícího vzduchu, ve vyhřívací jednotce ho zbaví vlhkosti a provede měření pomocí laserového paprsku s vlnovou délkou 650 nm. Opět se vyhodnocuje úbytek intenzity světla po průchodu přes měřený plyn.



Obr. 26. Schéma přístroje Durag 820, upraveno dle [39]

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. Odběrová sonda | 7. Měřicí přístroj |
| 2. Vyhřívání vzorku | 8. Reflektor |
| 3. Spaliny | 9. Laser a fotodioda |
| 4. Ohřev ředícího vzduchu | 10. Injektor |
| 5. Kompresor ředícího vzduchu | 11. Výstup změřeného plynu |
| 6. Trojcestný ventil | 12. Vzduchový kompresor |

Přístroj při nulování přepne trojcestný ventil a do měřicího přístroje připojí čistý vzduch, naměřená hodnota TZL opět musí být nulová. Kontrolní kalibrace se provádí u těchto měřáku v pravidelných ročních intervalech.

4.2.2.1 Kalibrační metoda pro měření emisí TZL

Kontrolní kalibrace se provádí v pravidelných ročních intervalech dle normy ČSN EN 14 181 Stacionární zdroje emisí - Prokazování jakosti automatizovaných měřících systémů. Vlastní měření je prováděno pomocí odběrové aparatury TECORA s vyhodnocením koncentrace TZL gravimetrickou metodou, jejíž výsledky jsou porovnány s naměřenými hodnotami kalibrovaného přístroje. Vzorek spalin je odebírán v 16 určených bodech měřicího průřezu, kdy se každému gravimetrickému odběru přiřadí průměrná hodnota v mA z kontrolovaného měřicího systému. Následně je proveden výpočet koeficientů kalibrační funkce měření. Zároveň je proveden test variability a kontrola nulového bodu a rozpětí.

Vztahy pro výpočet kalibrační funkce:

$$\hat{y} = \bar{a} + \bar{b} \cdot x_i \quad (73)$$

kde \hat{y} je nejlepší odhad skutečné hodnoty v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, \bar{a} a \bar{b} jsou koeficienty a x_i je i -tý měřený signál v mA. Výpočet směrnice \bar{b} a svislého posunu \bar{a} :

$$\bar{b} = \frac{y_{\text{prům}}}{x_{\text{prům}} - Z} \quad (74)$$

$$\bar{a} = -\bar{b} \cdot Z \quad (75)$$

$y_{\text{prům}}$ průměrná hodnota získaná z gravimetrického měření [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$x_{\text{prům}}$ průměrná hodnota signálu [mA]

Z rozdíl mezi nulovým čtením měřicího přístroje a nulou

Výpočty podle vzorců (5), (6) a (7) se provádějí pouze v případě, že rozdíl mezi největší a nejmenší gravimetrickou hodnotou nepřesahuje 30% emisního limitu.

Pro výpočet variability je použit vztah:

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (D_i - D_{\text{prům}})^2} \quad (76)$$

S_D směrodatná odchylka rozdílů D_i výsledků souběžného měření

N počet párových měření

D_i rozdíl mezi naměřenými hodnotami v jednom měření

$D_{\text{prům}}$ průměrná hodnota D_i

Test variability je vyhovující, pokud je splněna podmínka:

$$s_D \leq \sigma_o \cdot k_v \quad (77)$$

σ_o nejistota odvozená z legislativních požadavků

k_v zkušební hodnota pro zjištění variability, je rovna 0,9777

Pro výpočet hodnoty σ_o platí vztah:

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} \quad (78)$$

p procentuální podíl

E hodnota emisního limitu.

Kontrola driftu nulového bodu se provádí pomocí referenčního plynu o nulové koncentraci tuhých znečišťujících látek.

Pouze v případě splnění všech předepsaných podmínek je schváleno další provozování měřicí stanice dle ČSN EN 14 181.

4.3 Experimentální výsledky

4.3.1 Rozbory paliva

Palivová základna v 7EC je tvořena směsí hnědého uhlí ze dvou povrchových dolů v oblasti severočeské uhelné pánve, lomu Vršany a ČSA. Lom Vršany je nejmladší hnědouhelný lom v ČR a disponuje zásobami s nejdelší životností v rámci územních limitů. Výhřevnost paliva z tohoto lomu se pohybuje okolo hodnoty $11\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. V lomu Československé armády (ČSA) se těží naše nejkvalitnější hnědé uhlí, hodnota výhřevnosti je do $17,5\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. U obou dolů s těžbou probíhá rekultivace krajiny dle platné legislativy, hlavně lesnická, zemědělská a vodní. Palivo z obou dolů je primárně určeno pro využití v energetice a teplárenství, pro 7EC je mícháno na výhřevnost cca $14\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Rozbor paliva Mix z dolů Vršany a ČSA						
Měřený parametr	Označení	Jednotky	Horní limit denní	Spodní limit denní	Horní limit roční	Spodní limit roční
Obsah vody	W_{r_t}	% w	33	23,5	32	24,5
Obsah popela	A^r	% w	38	12	32	16
Obsah N	N^r	% w	0,8	0,2	0,7	0,3
Obsah O	O^r	% w	12	6	12	6
Obsah S	S^r	% w	2,8	0,6	2,5	0,7
Obsah C	C^r	% w	45	30	42	32
Obsah H	H^r	% w	3,8	2	3,7	2,5
Výhřevnost	Q_{r_i}	$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	17,2	12	16	12,5
Obsah prchavé hořlaviny	V_{daf}	% w	60	50	56	51
Tavitelnost popela	deformace	°C	1400	1200	1350	1250
Teploty zjišťované v oxidační atmosféře	měknutí	°C	>1500	1300	1520	1320
	tání	°C	>1500	1400	>1500	1440
	tečení	°C	>1500			

Tab. 10. Rozbor paliva Mix z dolů Vršany a ČSA

Chemický rozbor popela (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)					
Označení	Jednotky	Horní limit denní	Spodní limit denní	Horní limit roční	Spodní limit roční
Fe ₂ O ₃	%	15	3	12	4
Al ₂ O ₃	%	40	18	35	20
CaO	%	4,5	0,5	3,5	1
SO ₃	%	1,5	0	1	0
MnO	%	0,11	0,01	0,08	0,02
TiO ₂	%	2,8	1	2,5	1,3
MgO	%	2	0,2	1,5	0,5
Na ₂ O	%	5	0	4	0
K ₂ O	%	3	0,8	2,5	0,9
P ₂ O ₅	%	0,6	0,08	0,45	0,12

Tab. 11. Chemický rozbor popela (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)

Obsah stopových prvků v popelu (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)					
Označení	Jednotky	Horní limit denní	Spodní limit denní	Horní limit roční	Spodní limit roční
Cu	mg·kg ⁻¹	45	2	30	7
Zn	mg·kg ⁻¹	75	10	50	25
Co	mg·kg ⁻¹	50	2	35	8
Mn	mg·kg ⁻¹	280	40	220	80
Ni	mg·kg ⁻¹	45	10	35	15
Ba	mg·kg ⁻¹	300	10	250	40
Sr	mg·kg ⁻¹	200	30	150	70
Cr	mg·kg ⁻¹	80	10	50	25
V	mg·kg ⁻¹	250	20	150	40
Cd	mg·kg ⁻¹	0,15	0	0,1	0
Pb	mg·kg ⁻¹	32	2	22	7
Cl	%	0,15	0	0,1	0,02
Hg	mg·kg ⁻¹	0,5	0	0,35	0,05

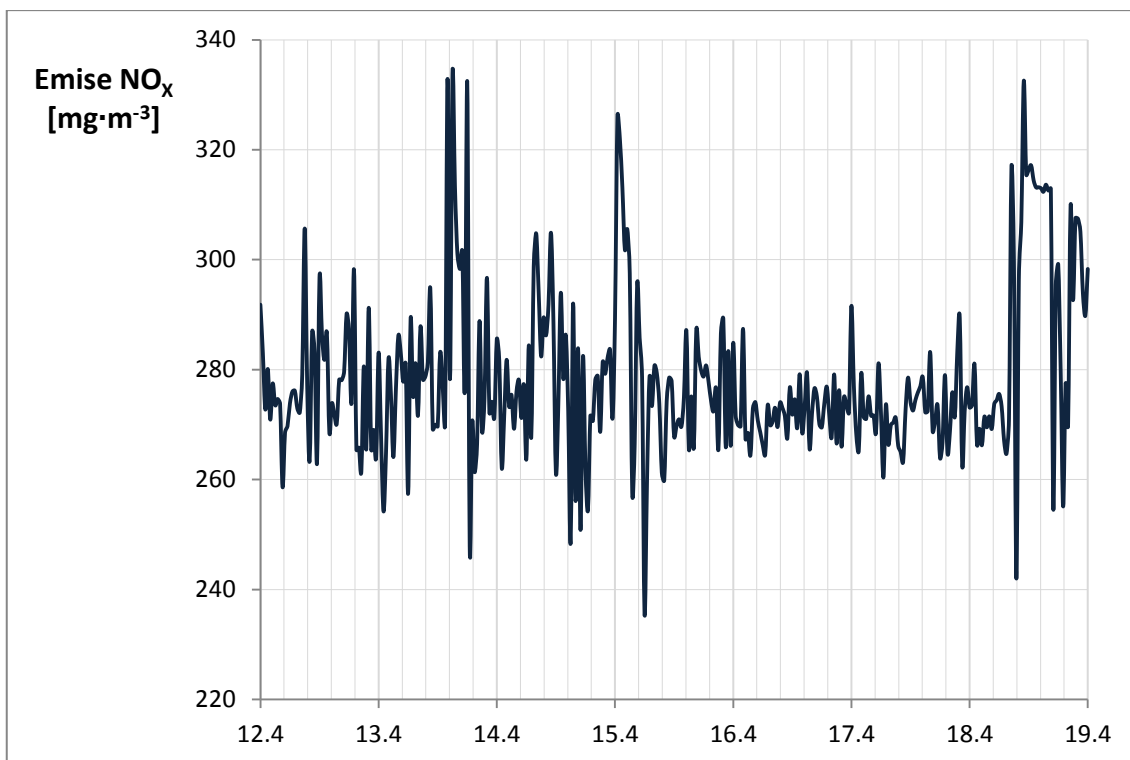
Tab. 12. Obsah stopových prvků v popelu (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)

4.3.2 Výsledky kontinuálních měření emisí oxidů dusíku

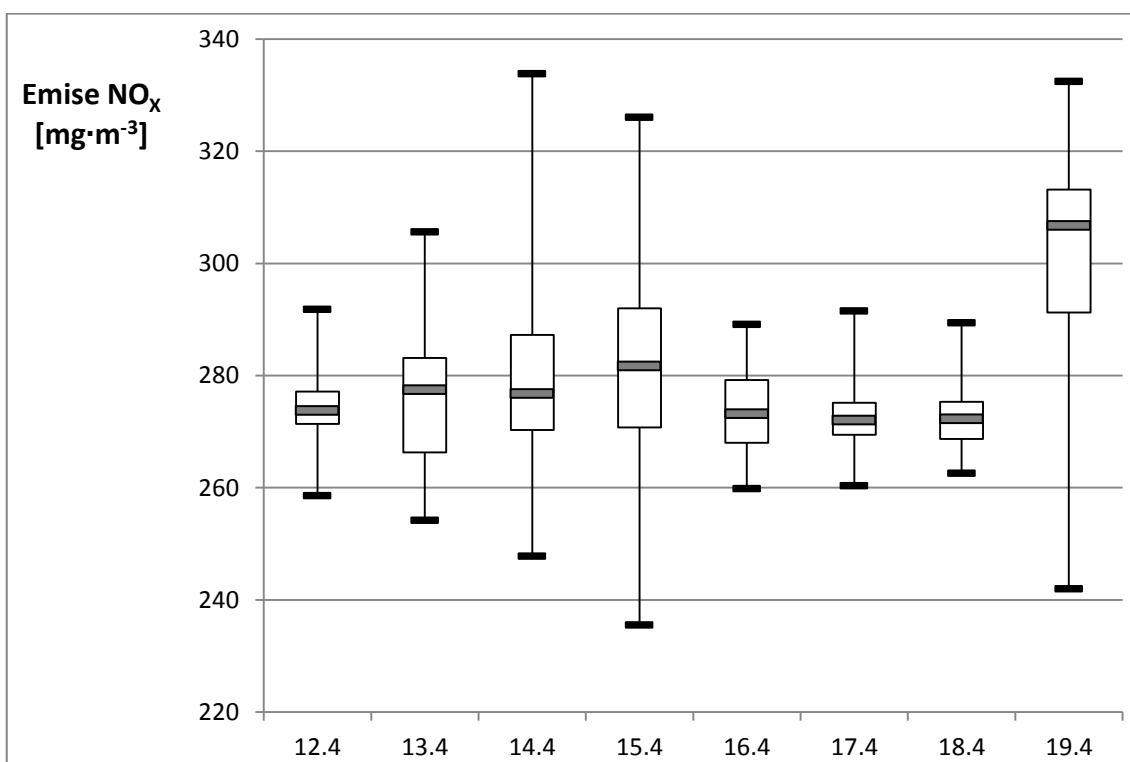
4.3.2.1 Výsledky kontinuálních měření NO_x bez sekundární denitrifikace

Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]
12.4.2015 16:00	291,82	13.4.2015 9:00	279,64	14.4.2015 2:00	281,36
12.4.2015 16:30	283,10	13.4.2015 9:30	290,13	14.4.2015 2:30	294,80
12.4.2015 17:00	272,72	13.4.2015 10:00	287,05	14.4.2015 3:00	269,17
12.4.2015 17:30	280,13	13.4.2015 10:30	273,92	14.4.2015 3:30	270,00
12.4.2015 18:00	270,93	13.4.2015 11:00	298,22	14.4.2015 4:00	269,70
12.4.2015 18:30	277,48	13.4.2015 11:30	265,40	14.4.2015 4:30	283,07
12.4.2015 19:00	273,55	13.4.2015 12:00	265,83	14.4.2015 5:00	277,39
12.4.2015 19:30	274,67	13.4.2015 12:30	261,51	14.4.2015 5:30	270,24
12.4.2015 20:00	273,76	13.4.2015 13:00	280,60	14.4.2015 6:00	332,89
12.4.2015 20:30	258,65	13.4.2015 13:30	265,58	14.4.2015 6:30	278,26
12.4.2015 21:00	268,51	13.4.2015 14:00	291,26	14.4.2015 7:00	333,87
12.4.2015 21:30	269,72	13.4.2015 14:30	265,61	14.4.2015 7:30	313,40
12.4.2015 22:00	273,88	13.4.2015 15:00	269,05	14.4.2015 8:00	301,11
12.4.2015 22:30	276,00	13.4.2015 15:30	264,08	14.4.2015 8:30	298,32
12.4.2015 23:00	276,15	13.4.2015 16:00	283,09	14.4.2015 9:00	301,47
12.4.2015 23:30	272,93	13.4.2015 16:30	267,78	14.4.2015 9:30	276,42
13.4.2015 0:00	272,21	13.4.2015 17:00	254,23	14.4.2015 10:00	332,19
13.4.2015 0:30	279,13	13.4.2015 17:30	264,63	14.4.2015 10:30	247,82
13.4.2015 1:00	305,68	13.4.2015 18:00	281,93	14.4.2015 11:00	270,47
13.4.2015 1:30	277,26	13.4.2015 18:30	275,55	14.4.2015 11:30	261,36
13.4.2015 2:00	263,40	13.4.2015 19:00	264,10	14.4.2015 12:00	266,51
13.4.2015 2:30	286,75	13.4.2015 19:30	276,04	14.4.2015 12:30	288,85
13.4.2015 3:00	283,15	13.4.2015 20:00	286,11	14.4.2015 13:00	268,79
13.4.2015 3:30	262,97	13.4.2015 20:30	283,06	14.4.2015 13:30	274,84
13.4.2015 4:00	296,77	13.4.2015 21:00	277,80	14.4.2015 14:00	296,71
13.4.2015 4:30	286,43	13.4.2015 21:30	280,99	14.4.2015 14:30	272,19
13.4.2015 5:00	281,77	13.4.2015 22:00	257,47	14.4.2015 15:00	274,17
13.4.2015 5:30	286,61	13.4.2015 22:30	289,23	14.4.2015 15:30	271,29
13.4.2015 6:00	268,60	13.4.2015 23:00	275,15	14.4.2015 16:00	285,55
13.4.2015 6:30	273,86	13.4.2015 23:30	281,15	14.4.2015 16:30	281,63
13.4.2015 7:00	271,89	14.4.2015 0:00	271,66	14.4.2015 17:00	262,18
13.4.2015 7:30	270,16	14.4.2015 0:30	287,83	14.4.2015 17:30	271,46
13.4.2015 8:00	278,17	14.4.2015 1:00	278,19	14.4.2015 18:00	281,80
13.4.2015 8:30	278,07	14.4.2015 1:30	278,75	14.4.2015 18:30	273,33

Tab. 13. Výřez hodnot kontinuálního měření NO_x bez SNCR



Graf 4. Grafické zpracování kontinuálního měření NO_x bez SNCR

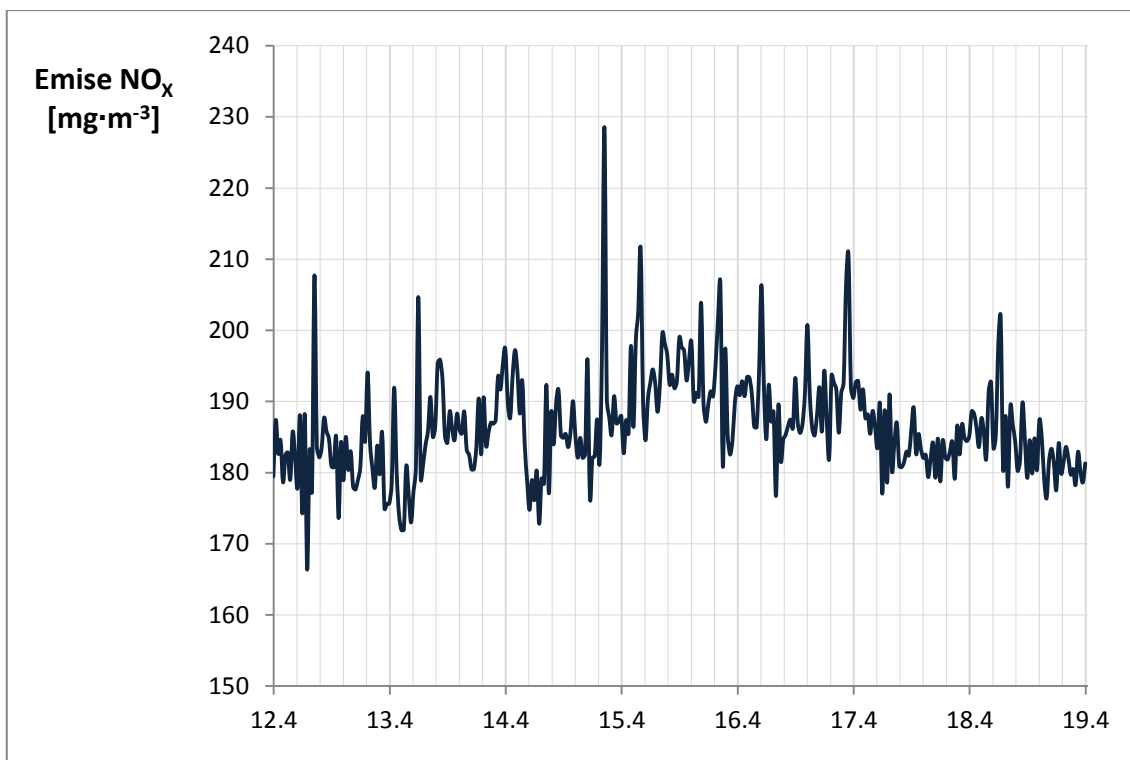


Graf 5. Statistické zpracování kontinuálního měření NO_x bez SNCR

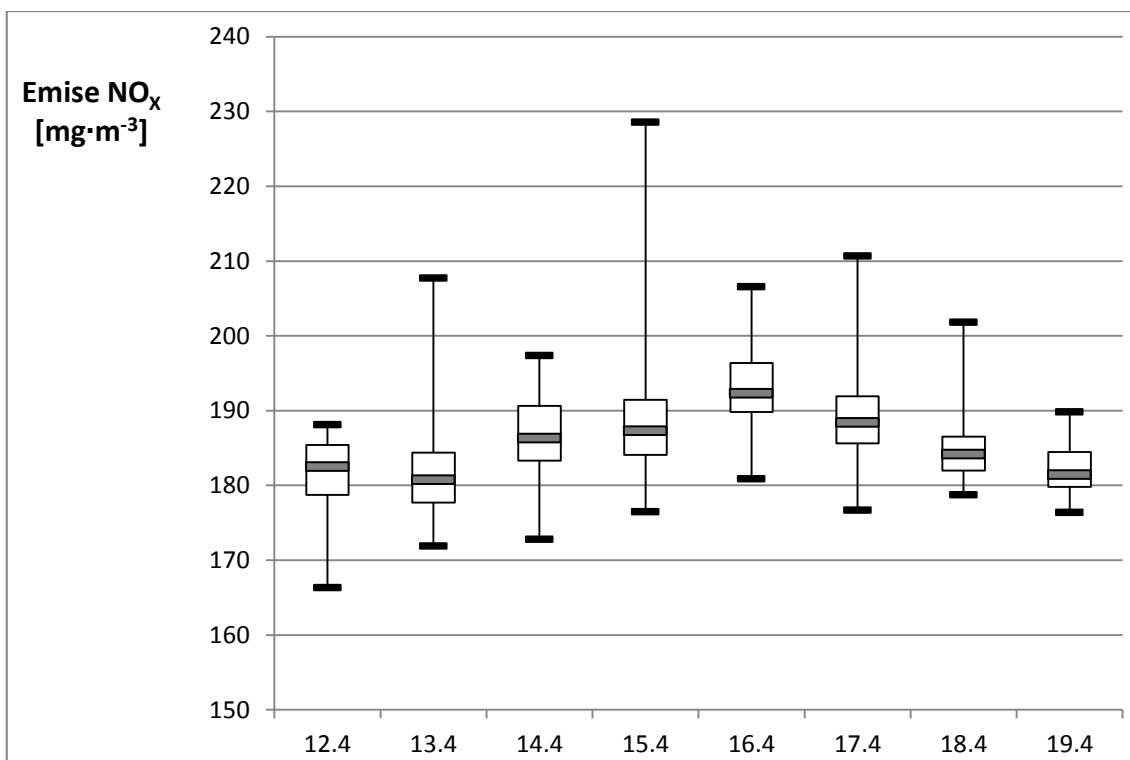
4.3.2.2 Výsledky kontinuálních měření NO_x se sekundární denitrifikací

Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	179,45	13.4.2018 9:00	177,62	14.4.2018 2:00	195,35
12.4.2018 16:30	187,37	13.4.2018 9:30	178,95	14.4.2018 2:30	195,88
12.4.2018 17:00	182,66	13.4.2018 10:00	180,77	14.4.2018 3:00	193,11
12.4.2018 17:30	184,54	13.4.2018 10:30	187,90	14.4.2018 3:30	185,19
12.4.2018 18:00	178,64	13.4.2018 11:00	184,45	14.4.2018 4:00	184,18
12.4.2018 18:30	182,42	13.4.2018 11:30	194,09	14.4.2018 4:30	188,63
12.4.2018 19:00	182,80	13.4.2018 12:00	184,21	14.4.2018 5:00	186,12
12.4.2018 19:30	179,00	13.4.2018 12:30	180,57	14.4.2018 5:30	184,59
12.4.2018 20:00	185,73	13.4.2018 13:00	177,91	14.4.2018 6:00	188,28
12.4.2018 20:30	182,20	13.4.2018 13:30	183,79	14.4.2018 6:30	186,13
12.4.2018 21:00	177,87	13.4.2018 14:00	179,78	14.4.2018 7:00	185,53
12.4.2018 21:30	188,09	13.4.2018 14:30	185,70	14.4.2018 7:30	188,59
12.4.2018 22:00	174,26	13.4.2018 15:00	174,92	14.4.2018 8:00	183,23
12.4.2018 22:30	188,15	13.4.2018 15:30	175,61	14.4.2018 8:30	182,53
12.4.2018 23:00	166,36	13.4.2018 16:00	175,71	14.4.2018 9:00	180,48
12.4.2018 23:30	183,21	13.4.2018 16:30	178,57	14.4.2018 9:30	180,53
13.4.2018 0:00	177,59	13.4.2018 17:00	191,95	14.4.2018 10:00	183,57
13.4.2018 0:30	207,72	13.4.2018 17:30	180,32	14.4.2018 10:30	190,43
13.4.2018 1:00	183,72	13.4.2018 18:00	174,12	14.4.2018 11:00	182,56
13.4.2018 1:30	182,14	13.4.2018 18:30	171,92	14.4.2018 11:30	190,60
13.4.2018 2:00	183,51	13.4.2018 19:00	171,99	14.4.2018 12:00	183,82
13.4.2018 2:30	187,71	13.4.2018 19:30	180,92	14.4.2018 12:30	185,59
13.4.2018 3:00	185,79	13.4.2018 20:00	176,93	14.4.2018 13:00	187,00
13.4.2018 3:30	184,76	13.4.2018 20:30	172,99	14.4.2018 13:30	186,87
13.4.2018 4:00	180,94	13.4.2018 21:00	177,38	14.4.2018 14:00	187,37
13.4.2018 4:30	180,80	13.4.2018 21:30	180,71	14.4.2018 14:30	193,54
13.4.2018 5:00	185,03	13.4.2018 22:00	204,68	14.4.2018 15:00	191,69
13.4.2018 5:30	173,61	13.4.2018 22:30	179,10	14.4.2018 15:30	195,33
13.4.2018 6:00	184,26	13.4.2018 23:00	181,24	14.4.2018 16:00	197,36
13.4.2018 6:30	178,92	13.4.2018 23:30	183,95	14.4.2018 16:30	189,95
13.4.2018 7:00	185,03	14.4.2018 0:00	185,89	14.4.2018 17:00	187,68
13.4.2018 7:30	180,38	14.4.2018 0:30	190,64	14.4.2018 17:30	193,50
13.4.2018 8:00	182,99	14.4.2018 1:00	185,02	14.4.2018 18:00	197,22
13.4.2018 8:30	178,02	14.4.2018 1:30	186,50	14.4.2018 18:30	194,24

Tab. 14. Výřez hodnot kontinuálního měření NO_x se SNCR



Graf 6. Grafické zpracování kontinuálního měření NO_x se SNCR



Graf 7. Statistické zpracování kontinuálního měření NO_x se SNCR

4.3.2.3 Kalibrace kontinuálních měření NO_x

Kalibrace byla prováděna souběžným měřením NO_x, kde AMS je měřící stanice a NRM je normovaná referenční hodnota zjištěna v měřícím voze HORIBA.

Naměřené hodnoty koncentrací NO_x:

Pořadové číslo měření [i]	Výsledek AMS	Výsledek NRM	Rozdíl	Rozdíl	Čtverec rozdílů
	$\hat{y}_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	$y_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	$D_i = y_{i,s} - \hat{y}_{i,s}$	$D_i - D_{prum}$	$(D_i - D_{prum})^2$
1	149	164	15	0,00	0,00
2	146	161	15	0,00	0,00
3	145	160	15	0,00	0,00
4	181	196	15	0,00	0,00
5	167	183	16	1,00	1,00
6	157	171	14	-1,00	1,00
Průměr			15,0		
Součet					2,00

Tab. 15. Naměřené hodnoty koncentrací NO_x měřící stanicí a vozem HORIBA

Naměřené hodnoty jsou přepočítány na suché spaliny při teplotě 0°C a tlaku 101 325 Pa a obsahu kyslíku 6 %. Nejprve byl proveden test variability:

Pro získání směrodatné odchylky byly dosazeny hodnoty do vztahu (69):

$$s_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (D_i - D_{prum})^2} = \sqrt{\frac{2,0}{5}} = 0,63 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Poté byl proveden test variability dle vztahu (71) :

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} = \frac{0,20 \cdot 424}{1,96} = 43,27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

a vztahu (70):

$$S_D \leq 1,5 \cdot \sigma_o \cdot k_v$$

$$0,63 \leq 1,50 \cdot 43,27 \cdot 0,9329$$

$$\mathbf{0,63 \leq 60,55}$$

Z uvedeného vyplývá, že měřicí stanice vyhovuje podmínkám testu.

Následně byla provedena kontrola platnosti kalibrační funkce, která je pro stanici ABB AO 2000 pro měření oxidů dusíku nastavena dle ČSN EN 14 181:

$$\hat{y} = -235,610 + 58,903 \cdot x_i$$

kde \hat{y} je hodnota množství NO_x v mg·m⁻³ a x_i hodnota proudu na výstupu v mA.

Ověření proběhlo dle vzorce (72):

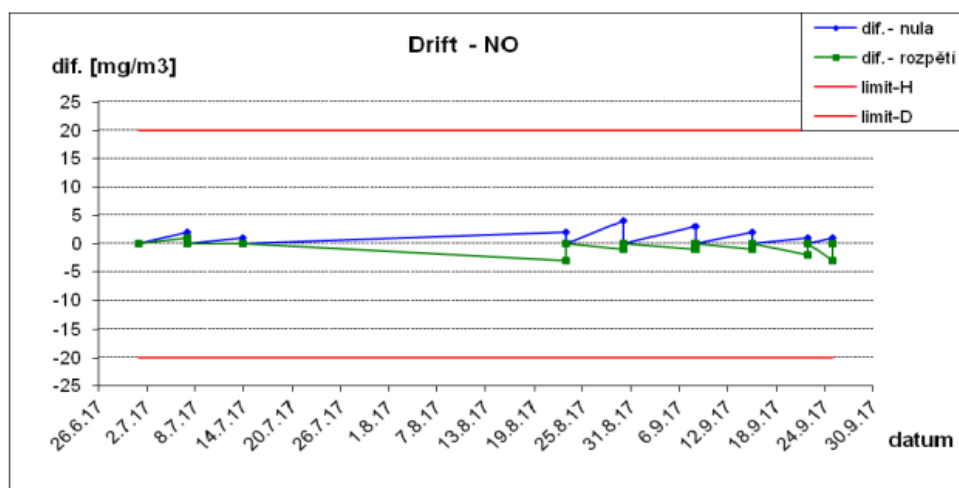
$$15,0 \leq 2,015 \cdot \left(\frac{0,63}{2,449}\right) + 43,3$$

$$\mathbf{15,0 \leq 43,8}$$

Ověření tedy potvrdilo správně zvolenou kalibrační funkci.

Při průběhu testu linearity byly požadované hodnoty koncentrace NO_x připraveny z plynu o koncentraci 1002 mg·m⁻³ NO v N₂. Test linearity kalibrační funkce potvrdil její správnost.

Při kontrole nulového bodu a rozpětí byly prověřeny hodnoty z týdenních kalibrací:



Graf 8. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace NO_x

složka	: NO				
rozsah	: 0 - 1000 mg/m3				
přípustný drift	: 20 mg/m3 (2 % z rozsahu)				
Datum	Ref.-nula	Čtení-nula	Ref.-rozpětí	Čtení-rozpětí	Dif.-rozpětí
1. 7. 2017		0			0
7. 7. 2017	0	2	600	601	1
7. 7. 2017		0			0
14. 7. 2017	0	1	600	600	0
14. 7. 2017		0			0
23. 8. 2017	0	2	600	597	-3
23. 8. 2017		0			0
30. 8. 2017	0	4	600	599	-1
30. 8. 2017		0			0
8. 9. 2017	0	3	600	599	-1
8. 9. 2017		0			0
15. 9. 2017	0	2	600	599	-1
15. 9. 2017		0			0
22. 9. 2017	0	1	600	598	-2
22. 9. 2017		0			0
25. 9. 2017	0	1	600	597	-3
25. 9. 2017		0			0

Tab. 16. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace NO_x

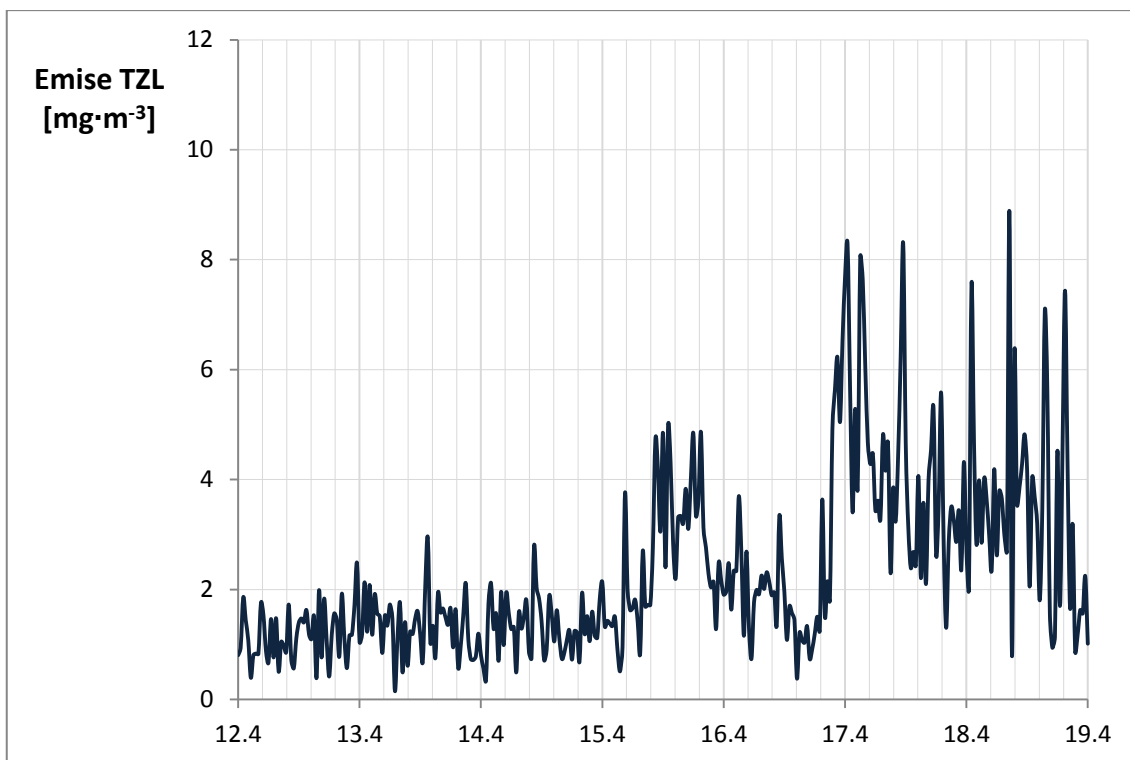
Měřicí stanice splňuje požadavky pro kontinuální měření NO_x dle ČSN EN 14 181.

4.3.3 Výsledky kontinuálních měření emisí tuhých znečišťujících látek

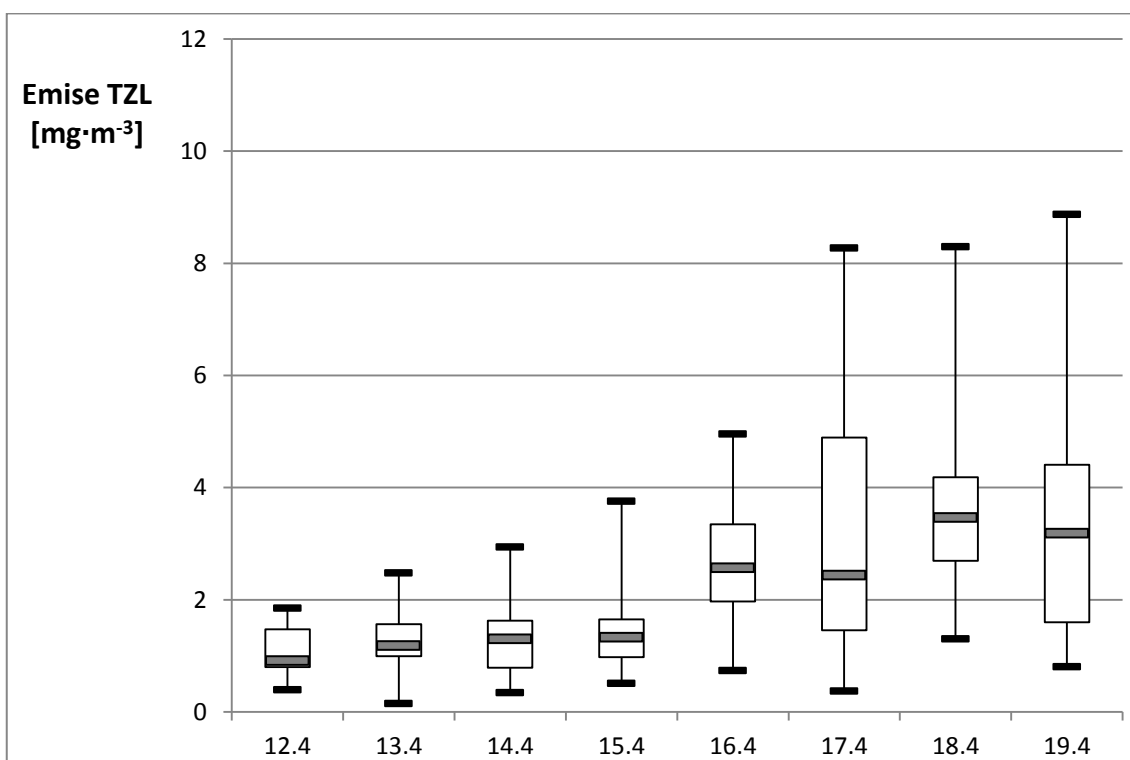
4.3.3.1 Výsledky kontinuálních měření za tkaninovými filtry

Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]	Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]	Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	0,81	13.4.2018 9:00	1,83	14.4.2018 2:00	1,23
12.4.2018 16:30	0,95	13.4.2018 9:30	1,07	14.4.2018 2:30	1,19
12.4.2018 17:00	1,86	13.4.2018 10:00	0,42	14.4.2018 3:00	1,47
12.4.2018 17:30	1,44	13.4.2018 10:30	1,17	14.4.2018 3:30	1,60
12.4.2018 18:00	1,08	13.4.2018 11:00	1,57	14.4.2018 4:00	1,18
12.4.2018 18:30	0,40	13.4.2018 11:30	1,45	14.4.2018 4:30	0,68
12.4.2018 19:00	0,80	13.4.2018 12:00	0,78	14.4.2018 5:00	2,08
12.4.2018 19:30	0,84	13.4.2018 12:30	1,92	14.4.2018 5:30	2,94
12.4.2018 20:00	0,83	13.4.2018 13:00	1,11	14.4.2018 6:00	1,04
12.4.2018 20:30	1,75	13.4.2018 13:30	0,57	14.4.2018 6:30	1,34
12.4.2018 21:00	1,53	13.4.2018 14:00	1,16	14.4.2018 7:00	0,76
12.4.2018 21:30	0,88	13.4.2018 14:30	1,18	14.4.2018 7:30	1,94
12.4.2018 22:00	0,67	13.4.2018 15:00	1,71	14.4.2018 8:00	1,59
12.4.2018 22:30	1,46	13.4.2018 15:30	2,48	14.4.2018 8:30	1,66
12.4.2018 23:00	0,76	13.4.2018 16:00	1,05	14.4.2018 9:00	1,49
12.4.2018 23:30	1,48	13.4.2018 16:30	1,18	14.4.2018 9:30	1,36
13.4.2018 0:00	0,51	13.4.2018 17:00	2,13	14.4.2018 10:00	1,66
13.4.2018 0:30	1,05	13.4.2018 17:30	1,23	14.4.2018 10:30	0,95
13.4.2018 1:00	0,98	13.4.2018 18:00	2,08	14.4.2018 11:00	1,64
13.4.2018 1:30	0,86	13.4.2018 18:30	1,18	14.4.2018 11:30	0,58
13.4.2018 2:00	1,73	13.4.2018 19:00	1,91	14.4.2018 12:00	0,97
13.4.2018 2:30	0,73	13.4.2018 19:30	1,56	14.4.2018 12:30	1,52
13.4.2018 3:00	0,57	13.4.2018 20:00	1,51	14.4.2018 13:00	2,12
13.4.2018 3:30	1,11	13.4.2018 20:30	0,85	14.4.2018 13:30	1,10
13.4.2018 4:00	1,40	13.4.2018 21:00	1,52	14.4.2018 14:00	0,74
13.4.2018 4:30	1,48	13.4.2018 21:30	1,35	14.4.2018 14:30	0,72
13.4.2018 5:00	1,40	13.4.2018 22:00	1,73	14.4.2018 15:00	0,79
13.4.2018 5:30	1,63	13.4.2018 22:30	1,47	14.4.2018 15:30	1,20
13.4.2018 6:00	1,19	13.4.2018 23:00	0,15	14.4.2015 16:00	0,81
13.4.2018 6:30	1,10	13.4.2018 23:30	1,11	14.4.2015 16:30	0,57
13.4.2018 7:00	1,52	14.4.2018 0:00	1,76	14.4.2015 17:00	0,35
13.4.2018 7:30	0,39	14.4.2018 0:30	0,49	14.4.2015 17:30	1,75
13.4.2018 8:00	1,99	14.4.2018 1:00	1,41	14.4.2015 18:00	2,12
13.4.2018 8:30	0,76	14.4.2018 1:30	0,61	14.4.2015 18:30	1,29

Tab. 17. Výřez hodnot kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry



Graf 9. Grafické zpracování kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry

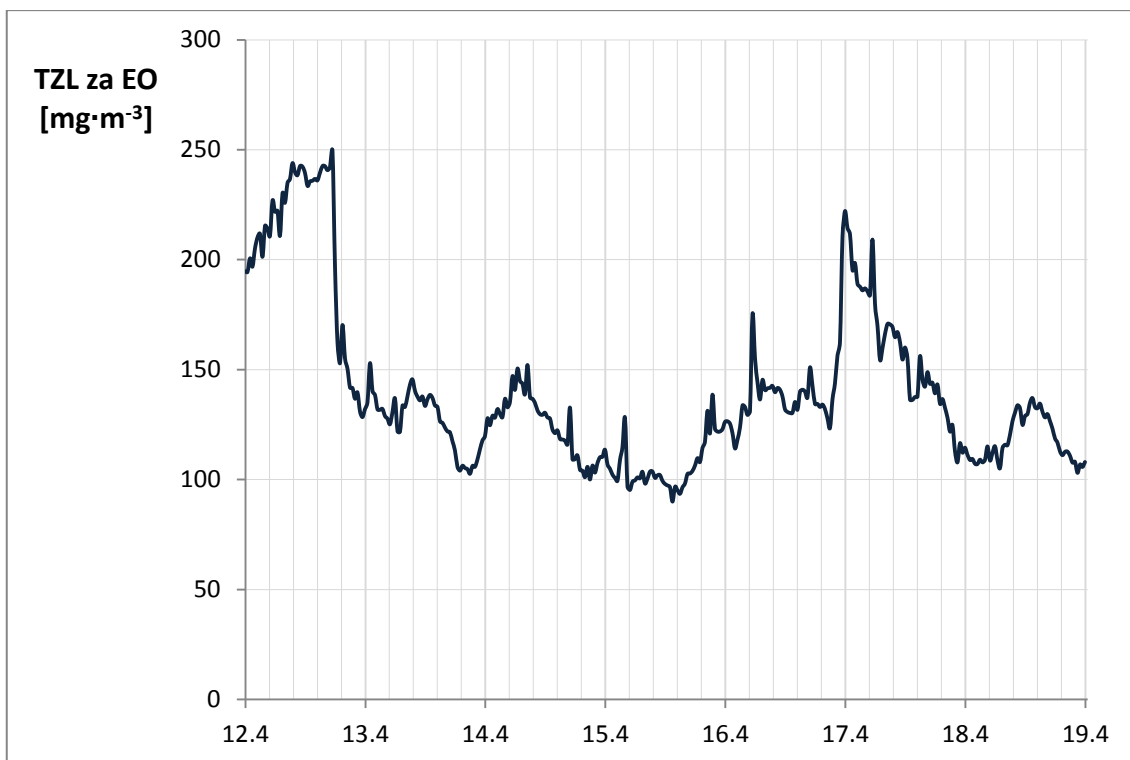


Graf 10. Statistické zpracování kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry

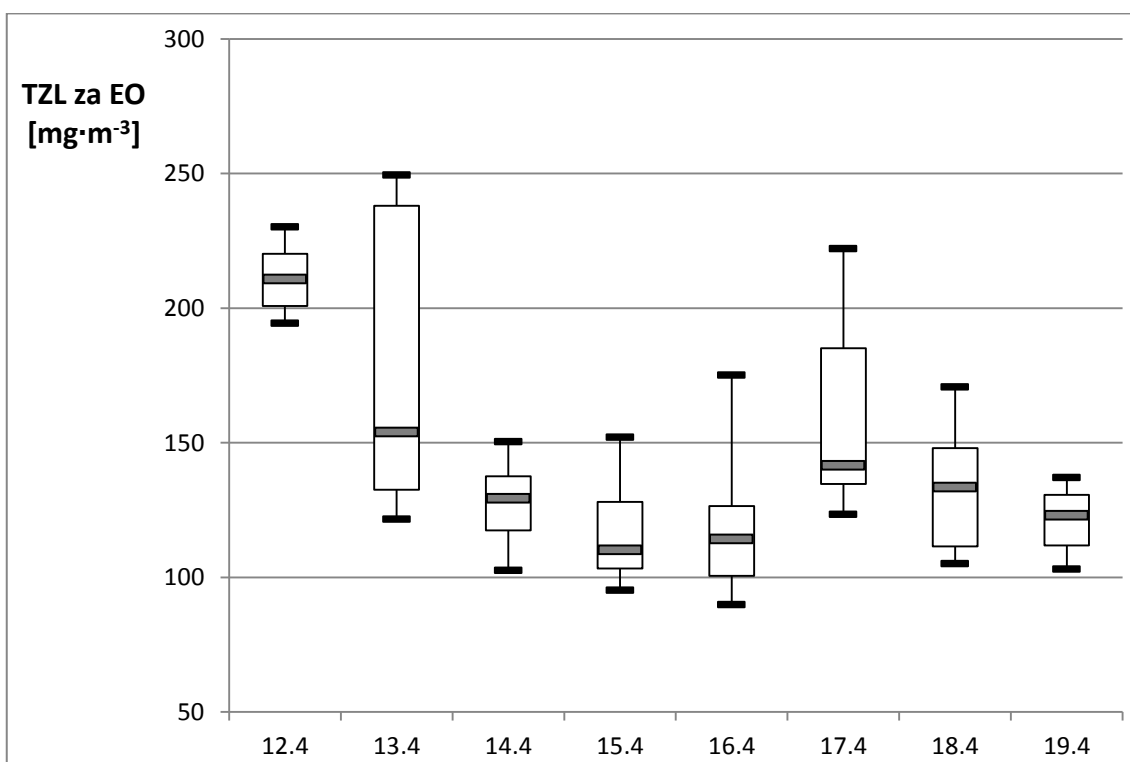
4.3.3.2 Výsledky kontinuálních měření TZL za elektrostatickými odlučovači

Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]	Datum a čas	NO _x [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	194,80	13.4.2018 9:00	242,08	14.4.2018 2:00	140,34
12.4.2018 16:30	194,42	13.4.2018 9:30	249,44	14.4.2018 2:30	137,71
12.4.2018 17:00	200,65	13.4.2018 10:00	196,89	14.4.2018 3:00	136,02
12.4.2018 17:30	196,86	13.4.2018 10:30	162,44	14.4.2018 3:30	137,80
12.4.2018 18:00	205,11	13.4.2018 11:00	152,94	14.4.2018 4:00	133,50
12.4.2018 18:30	210,12	13.4.2018 11:30	170,32	14.4.2018 4:30	136,54
12.4.2018 19:00	211,74	13.4.2018 12:00	155,19	14.4.2018 5:00	138,53
12.4.2018 19:30	201,33	13.4.2018 12:30	150,42	14.4.2018 5:30	137,10
12.4.2018 20:00	215,39	13.4.2018 13:00	141,85	14.4.2018 6:00	133,67
12.4.2018 20:30	214,17	13.4.2018 13:30	141,67	14.4.2018 6:30	133,04
12.4.2018 21:00	210,85	13.4.2018 14:00	136,76	14.4.2018 7:00	126,52
12.4.2018 21:30	226,88	13.4.2018 14:30	139,67	14.4.2018 7:30	125,84
12.4.2018 22:00	221,77	13.4.2018 15:00	130,94	14.4.2018 8:00	123,64
12.4.2018 22:30	222,21	13.4.2018 15:30	128,42	14.4.2018 8:30	121,90
12.4.2018 23:00	210,85	13.4.2018 16:00	132,05	14.4.2018 9:00	121,48
12.4.2018 23:30	230,17	13.4.2018 16:30	135,18	14.4.2018 9:30	117,37
13.4.2018 0:00	225,89	13.4.2018 17:00	152,95	14.4.2018 10:00	113,17
13.4.2018 0:30	234,90	13.4.2018 17:30	140,32	14.4.2018 10:30	105,75
13.4.2018 1:00	236,73	13.4.2018 18:00	138,52	14.4.2018 11:00	104,08
13.4.2018 1:30	243,93	13.4.2018 18:30	131,95	14.4.2018 11:30	106,32
13.4.2018 2:00	239,79	13.4.2018 19:00	131,75	14.4.2018 12:00	105,26
13.4.2018 2:30	238,44	13.4.2018 19:30	132,13	14.4.2018 12:30	104,75
13.4.2018 3:00	242,55	13.4.2018 20:00	128,92	14.4.2018 13:00	102,64
13.4.2018 3:30	242,31	13.4.2018 20:30	127,68	14.4.2018 13:30	106,23
13.4.2018 4:00	239,45	13.4.2018 21:00	125,18	14.4.2018 14:00	105,84
13.4.2018 4:30	233,58	13.4.2018 21:30	130,72	14.4.2018 14:30	109,25
13.4.2018 5:00	235,57	13.4.2018 22:00	136,94	14.4.2018 15:00	113,81
13.4.2018 5:30	235,91	13.4.2018 22:30	122,00	14.4.2018 15:30	117,85
13.4.2018 6:00	236,76	13.4.2018 23:00	121,73	14.4.2015 16:00	285,55
13.4.2018 6:30	236,11	13.4.2018 23:30	133,65	14.4.2015 16:30	281,63
13.4.2018 7:00	239,54	14.4.2018 0:00	132,98	14.4.2015 17:00	262,18
13.4.2018 7:30	242,56	14.4.2018 0:30	137,93	14.4.2015 17:30	271,46
13.4.2018 8:00	242,51	14.4.2018 1:00	143,19	14.4.2015 18:00	281,8
13.4.2018 8:30	240,70	14.4.2018 1:30	145,57	14.4.2015 18:30	273,33

Tab. 18. Výřez hodnot kontinuálního měření emisí TZL za EO



Graf 11. Grafické zpracování kontinuálního měření TZL za EO

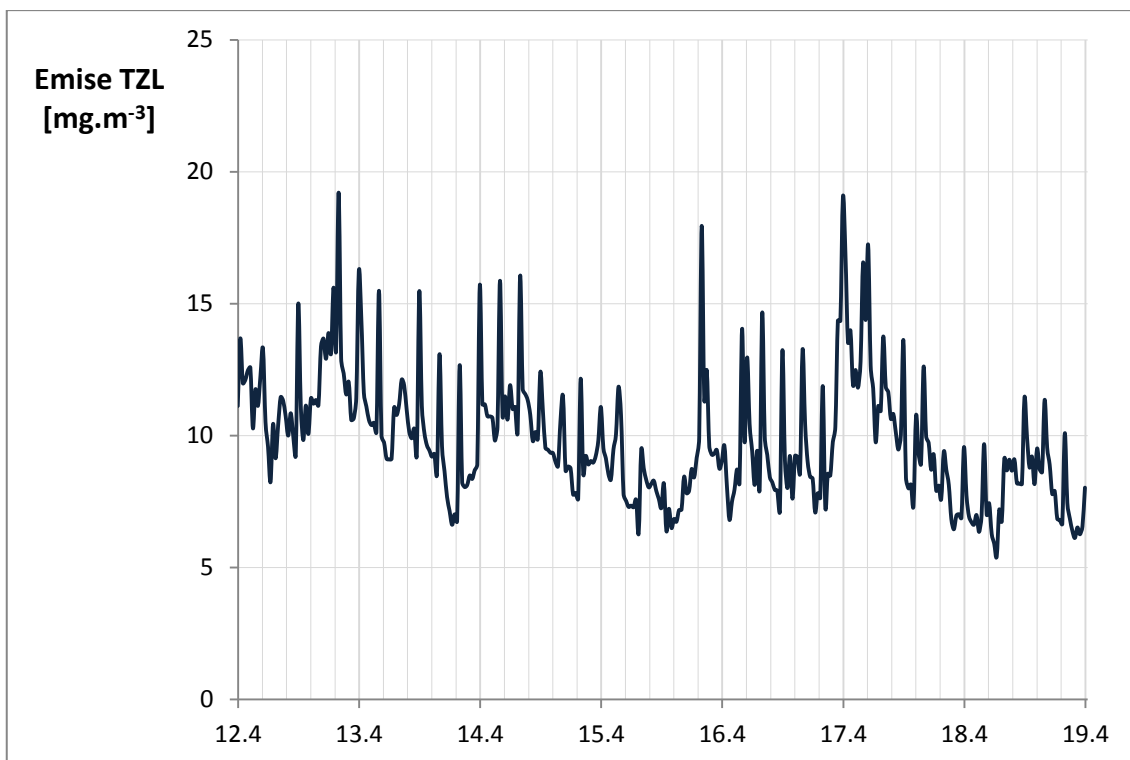


Graf 12. Statistické zpracování kontinuálního měření TZL za EO

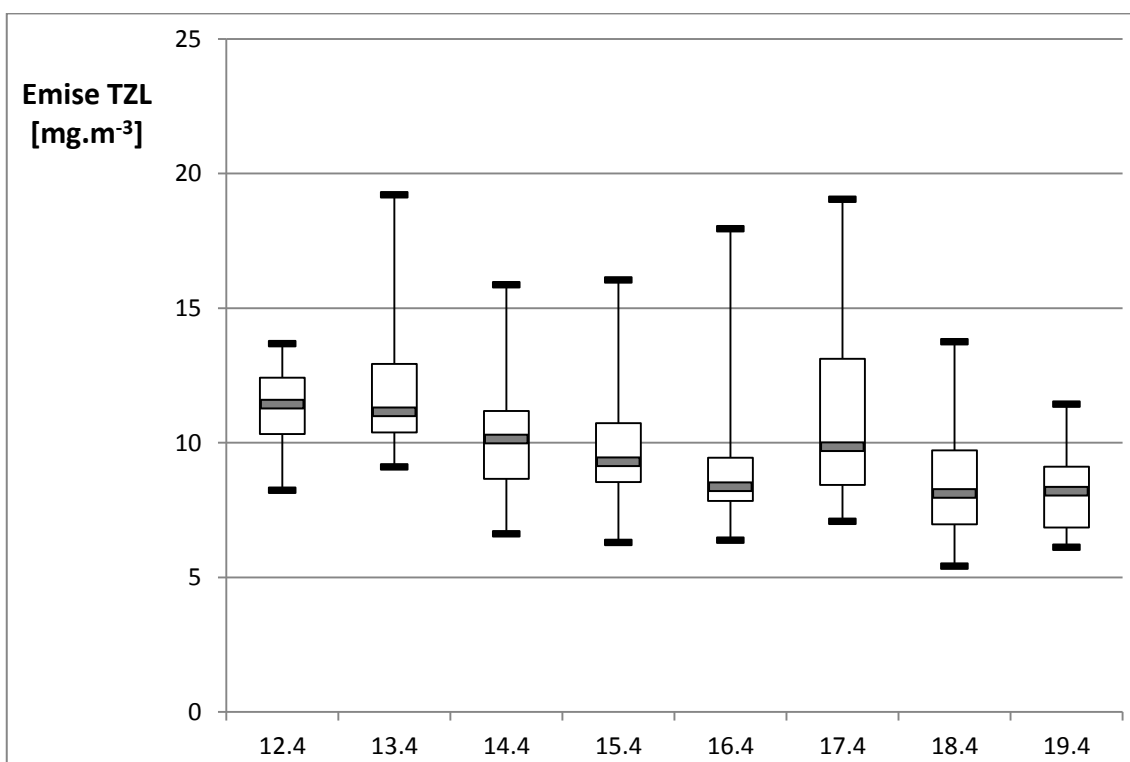
4.3.3.3 Výsledky kontinuálních měření emisí TZL za odsiřovací linkou

Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]	Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]	Datum a čas	TZL [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	11,12	13.4.2018 9:00	13,68	14.4.2018 2:00	10,15
12.4.2018 16:30	13,68	13.4.2018 9:30	12,91	14.4.2018 2:30	9,9
12.4.2018 17:00	11,99	13.4.2018 10:00	13,89	14.4.2018 3:00	10,26
12.4.2018 17:30	12,11	13.4.2018 10:30	13,12	14.4.2018 3:30	9,27
12.4.2018 18:00	12,47	13.4.2018 11:00	15,61	14.4.2018 4:00	15,46
12.4.2018 18:30	12,58	13.4.2018 11:30	13,23	14.4.2018 4:30	11,14
12.4.2018 19:00	10,28	13.4.2018 12:00	19,21	14.4.2018 5:00	10,12
12.4.2018 19:30	11,75	13.4.2018 12:30	12,93	14.4.2018 5:30	9,64
12.4.2018 20:00	11,13	13.4.2018 13:00	12,36	14.4.2018 6:00	9,44
12.4.2018 20:30	12,26	13.4.2018 13:30	11,56	14.4.2018 6:30	9,2
12.4.2018 21:00	13,3	13.4.2018 14:00	12,03	14.4.2018 7:00	9,3
12.4.2018 21:30	10,52	13.4.2018 14:30	10,6	14.4.2018 7:30	8,54
12.4.2018 22:00	9,58	13.4.2018 15:00	10,65	14.4.2018 8:00	13,08
12.4.2018 22:30	8,24	13.4.2018 15:30	11,43	14.4.2018 8:30	9,6
12.4.2018 23:00	10,44	13.4.2018 16:00	16,22	14.4.2018 9:00	8,65
12.4.2018 23:30	9,14	13.4.2018 16:30	14,46	14.4.2018 9:30	7,68
13.4.2018 0:00	10,38	13.4.2018 17:00	11,63	14.4.2018 10:00	7,15
13.4.2018 0:30	11,45	13.4.2018 17:30	11,11	14.4.2018 10:30	6,62
13.4.2018 1:00	11,32	13.4.2018 18:00	10,6	14.4.2018 11:00	7,02
13.4.2018 1:30	10,74	13.4.2018 18:30	10,4	14.4.2018 11:30	6,75
13.4.2018 2:00	10	13.4.2018 19:00	10,48	14.4.2018 12:00	12,66
13.4.2018 2:30	10,85	13.4.2018 19:30	10,13	14.4.2018 12:30	8,23
13.4.2018 3:00	9,99	13.4.2018 20:00	15,49	14.4.2018 13:00	8,05
13.4.2018 3:30	9,27	13.4.2018 20:30	10	14.4.2018 13:30	8,13
13.4.2018 4:00	14,99	13.4.2018 21:00	9,75	14.4.2018 14:00	8,49
13.4.2018 4:30	11,11	13.4.2018 21:30	9,13	14.4.2018 14:30	8,36
13.4.2018 5:00	9,83	13.4.2018 22:00	9,1	14.4.2018 15:00	8,7
13.4.2018 5:30	11,14	13.4.2018 22:30	9,12	14.4.2018 15:30	8,91
13.4.2018 6:00	10,06	13.4.2018 23:00	11,06	14.4.2018 16:00	15,7
13.4.2018 6:30	11,41	13.4.2018 23:30	10,78	14.4.2018 16:30	11,19
13.4.2018 7:00	11,21	14.4.2018 0:00	11,19	14.4.2018 17:00	11,19
13.4.2018 7:30	11,35	14.4.2018 0:30	12,12	14.4.2018 17:30	10,74
13.4.2018 8:00	11,15	14.4.2018 1:00	11,9	14.4.2018 18:00	10,73
13.4.2018 8:30	13,38	14.4.2018 1:30	10,97	14.4.2018 18:30	10,67

Tab. 19. Výřez hodnot kontinuálního měření emisí TZL za ODS



Graf 13. Grafické zpracování kontinuálního měření emisí TZL za ODS



Graf 14. Statistické zpracování kontinuálního měření emisí TZL ODS

4.3.3.4 Kalibrace kontinuálních měření TZL

Při souběžném měření TZL byly načteny následující hodnoty:

Pořadové číslo měření	Signál přístroje	Výsledek NRM
	x_i [mA]	y_i [mg·m ⁻³]
1	9,74	24,70
2	9,46	20,60
3	9,62	21,90
4	9,00	19,70
5	9,15	20,60
6	8,96	18,30
7	7,23	13,20
8	6,84	12,00
9	6,56	10,20
10	7,81	13,20
11	8,48	17,60
12	8,48	18,20
13	7,00	13,50
14	6,84	9,40
15	7,49	14,10
16	7,82	14,80
Průměr	8,16	16,38

Tab. 20. Naměřené hodnoty proudového výstupu a gravimetrie TZL

Kde x_i je odečtená proudová hodnota z kalibrovaného přístroje a y_i je výsledek gravimetrického měření. Pro určení koeficientů kalibrační funkce byly použity vztahy (73), (74) a (75). Hodnota Z byla odečtena při kontrole nulového bodu (viz tab. 22).

Výpočet směrnice kalibrační přímky:

$$\bar{b} = \frac{16,38}{8,16 - 4,0} = 3,938$$

Výpočet svislého posunu kalibrační přímky:

$$\bar{a} = -3,938 \cdot 4,0 = -15,752$$

Kalibrační funkce má tvar:

$$\hat{y} = -15,752 + 3,938 \cdot x_i$$

Při testu variability byly naměřeny hodnoty:

Pořadové číslo měření [i]	Výsledek gravimetrie $\hat{y}_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	Výsledek měřicího přístroje $y_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	Rozdíl $D_i = y_{i,s} - \hat{y}_{i,s}$	Rozdíl $D_i - D_{prum}$	Čtverec rozdílů $(D_i - D_{prum})^2$
1	37,50	41,00	3,50	3,47	12,03
2	35,50	34,00	-1,50	-1,53	2,34
3	37,20	36,80	-0,40	-0,43	0,19
4	33,30	33,30	0,00	-0,03	0,00
5	31,80	32,30	0,50	0,47	0,22
6	32,90	30,90	-2,00	-2,03	4,13
7	21,20	22,00	0,80	0,77	0,59
8	18,80	20,10	1,30	1,27	1,61
9	16,40	16,50	0,10	0,07	0,00
10	24,90	21,90	-3,00	-3,03	9,19
11	29,30	29,30	0,00	-0,03	0,00
12	29,40	30,40	1,00	0,97	0,94
13	19,90	22,70	2,80	2,77	7,67
14	18,80	15,80	-3,00	-3,03	9,19
15	23,00	23,70	0,70	0,67	0,45
16	24,60	24,30	-0,30	-0,33	0,11
Průměr			0,0313		
Součet					48,66

Tab. 21. Experimentální výsledky pro výpočet testu variability

Pro výpočet směrodatné odchylky byly dosazeny hodnoty do vztahu (76):

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (D_i - D_{prum})^2} = \sqrt{\frac{48,66}{15}} = 1,80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

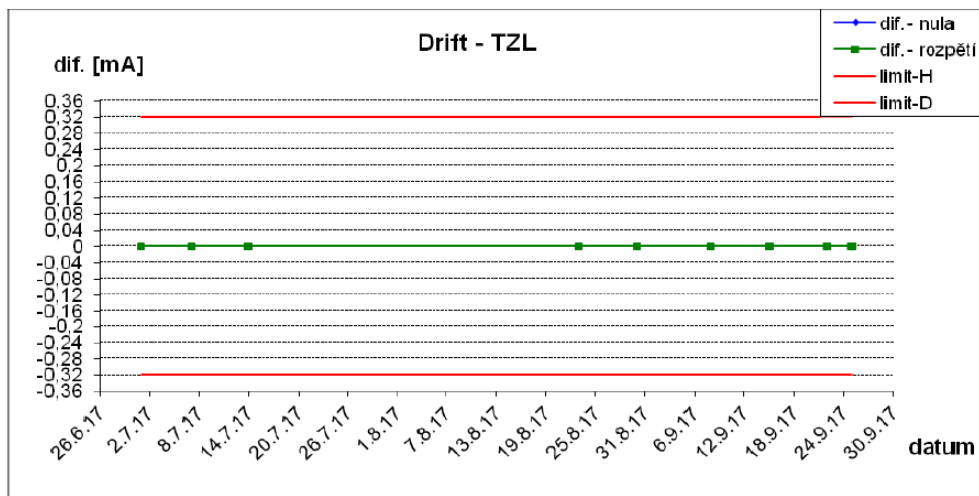
Po určení σ_o by použit vztah (78):

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} = \frac{0,3 \cdot 100}{1,96} = 15,3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Test variability vyhovuje podmínce (77):

$$S_D \leq \sigma_o \cdot k_v \text{ tj. } 1,80 \leq 15,0$$

Při kontrole nulového bodu byly prověřeny hodnoty z týdenních kalibrací, kdy maximální přípustná odchylka je 2% z rozsahu měřicího přístroje:



Graf 15. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace TZL

složka	: TZL						
rozsah	: 4 - 20 mA						
přípustný drift	: 0,32 mA (2 % z rozsahu)						
	Datum	Ref.-nula	Čtení-nula	Dif.-nula	Ref.-rozpětí	Čtení-rozpětí	Dif.-rozpětí
	1. 7. 2017		0	0			0
	7. 7. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	7. 7. 2017		0	0			0
	14. 7. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	14. 7. 2017		0	0			0
	23. 8. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	23. 8. 2017		0	0			0
	30. 8. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	30. 8. 2017		0	0			0
	8. 9. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	8. 9. 2017		0	0			0
	15. 9. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	15. 9. 2017		0	0			0
	22. 9. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	22. 9. 2017		0	0			0
	25. 9. 2017	4	4	0	15,2	15,2	0
	25. 9. 2017		0	0			0

Tab. 22. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace TZL

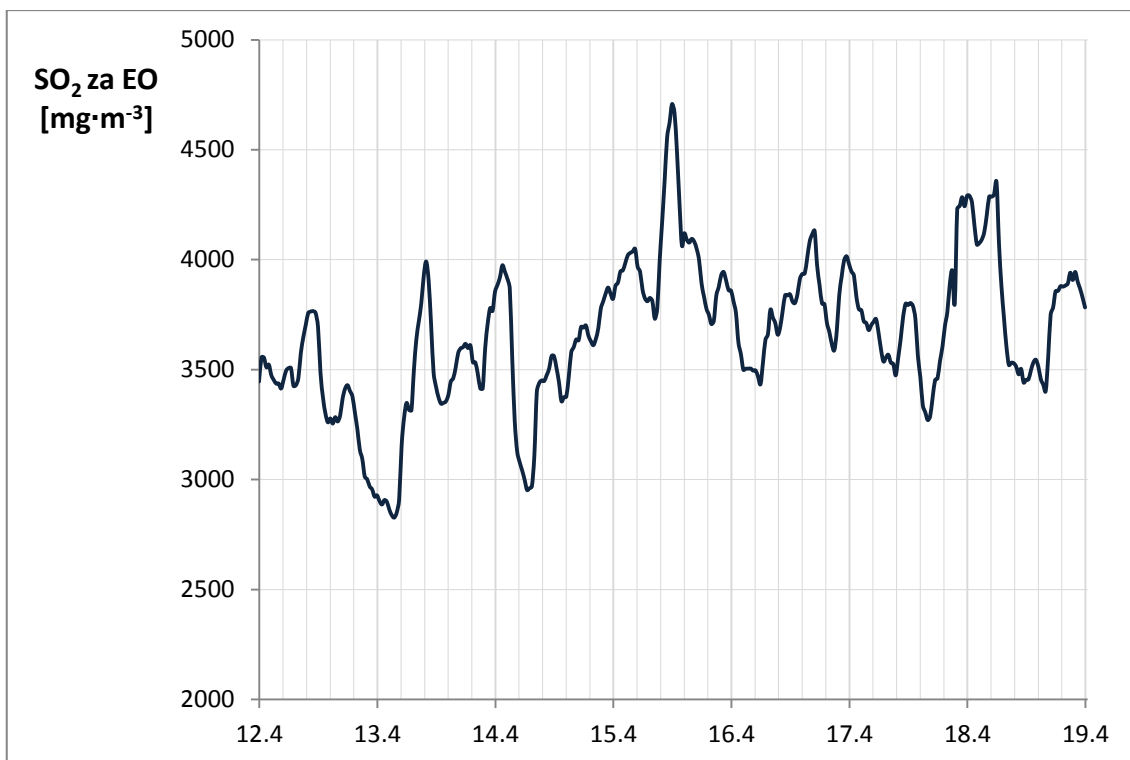
Měřicí přístroj splňuje všechny požadavky pro kontinuální měření TZL dle ČSN EN 14 181.

4.3.4 Výsledky kontinuálních měření emisí oxidů síry

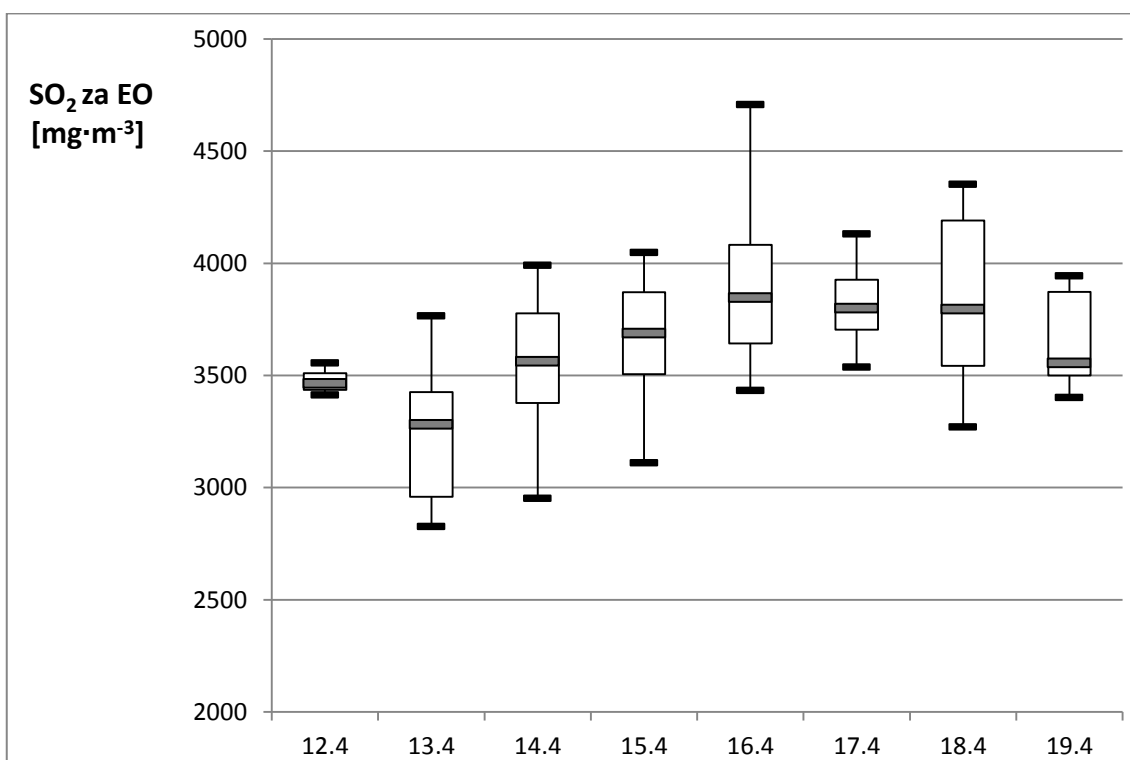
4.3.4.1 Výsledky kontinuálních měření SO₂ za elektrostatickými odlučovači

Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]	Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]	Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	3445,92	13.4.2018 9:00	3368,54	14.4.2018 2:00	3991,75
12.4.2018 16:30	3555,99	13.4.2018 9:30	3413,35	14.4.2018 2:30	3904,42
12.4.2018 17:00	3555,13	13.4.2018 10:00	3429,55	14.4.2018 3:00	3704,04
12.4.2018 17:30	3510,70	13.4.2018 10:30	3403,03	14.4.2018 3:30	3487,85
12.4.2018 18:00	3522,78	13.4.2018 11:00	3378,33	14.4.2018 4:00	3422,58
12.4.2018 18:30	3474,87	13.4.2018 11:30	3304,46	14.4.2018 4:30	3374,69
12.4.2018 19:00	3453,13	13.4.2018 12:00	3230,08	14.4.2018 5:00	3345,71
12.4.2018 19:30	3436,33	13.4.2018 12:30	3136,01	14.4.2018 5:30	3348,95
12.4.2018 20:00	3436,98	13.4.2018 13:00	3094,46	14.4.2018 6:00	3355,51
12.4.2018 20:30	3414,10	13.4.2018 13:30	3014,36	14.4.2018 6:30	3384,10
12.4.2018 21:00	3453,94	13.4.2018 14:00	3001,63	14.4.2018 7:00	3445,48
12.4.2018 21:30	3494,98	13.4.2018 14:30	2969,26	14.4.2018 7:30	3461,00
12.4.2018 22:00	3506,99	13.4.2018 15:00	2955,71	14.4.2018 8:00	3509,83
12.4.2018 22:30	3507,36	13.4.2018 15:30	2922,70	14.4.2018 8:30	3575,22
12.4.2018 23:00	3426,70	13.4.2018 16:00	2928,29	14.4.2018 9:00	3596,53
12.4.2018 23:30	3429,17	13.4.2018 16:30	2902,98	14.4.2018 9:30	3602,22
13.4.2018 0:00	3460,86	13.4.2018 17:00	2886,70	14.4.2018 10:00	3617,79
13.4.2018 0:30	3574,71	13.4.2018 17:30	2907,04	14.4.2018 10:30	3598,04
13.4.2018 1:00	3646,20	13.4.2018 18:00	2899,38	14.4.2018 11:00	3610,63
13.4.2018 1:30	3702,57	13.4.2018 18:30	2863,85	14.4.2018 11:30	3533,78
13.4.2018 2:00	3757,24	13.4.2018 19:00	2838,36	14.4.2018 12:00	3532,74
13.4.2018 2:30	3764,10	13.4.2018 19:30	2827,09	14.4.2018 12:30	3479,93
13.4.2018 3:00	3766,12	13.4.2018 20:00	2849,51	14.4.2018 13:00	3414,38
13.4.2018 3:30	3758,38	13.4.2018 20:30	2910,02	14.4.2018 13:30	3414,73
13.4.2018 4:00	3694,24	13.4.2018 21:00	3153,19	14.4.2018 14:00	3597,48
13.4.2018 4:30	3487,34	13.4.2018 21:30	3280,57	14.4.2018 14:30	3707,55
13.4.2018 5:00	3374,37	13.4.2018 22:00	3348,52	14.4.2018 15:00	3779,83
13.4.2018 5:30	3301,37	13.4.2018 22:30	3317,16	14.4.2018 15:30	3767,39
13.4.2018 6:00	3260,64	13.4.2018 23:00	3315,40	14.4.2018 16:00	3854,32
13.4.2018 6:30	3278,22	13.4.2018 23:30	3498,27	14.4.2018 16:30	3885,38
13.4.2018 7:00	3254,87	14.4.2018 0:00	3638,00	14.4.2018 17:00	3919,84
13.4.2018 7:30	3284,06	14.4.2018 0:30	3719,97	14.4.2018 17:30	3974,63
13.4.2018 8:00	3264,35	14.4.2018 1:00	3801,20	14.4.2018 18:00	3945,68
13.4.2018 8:30	3291,91	14.4.2018 1:30	3925,18	14.4.2018 18:30	3914,08

Tab. 23. Výřez hodnot kontinuálního měření SO₂ za EO



Graf 16. Grafické zpracování kontinuálního měření SO₂ za EO

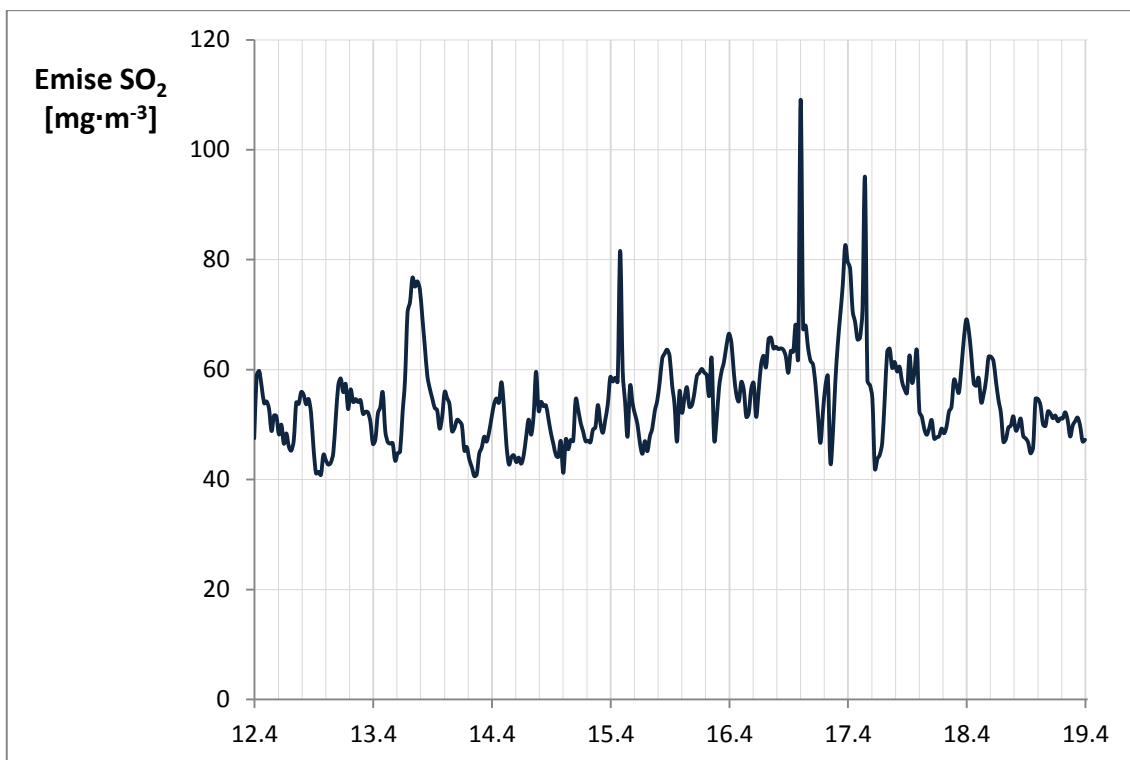


Graf 17. Statistické zpracování kontinuálního měření SO₂ za EO

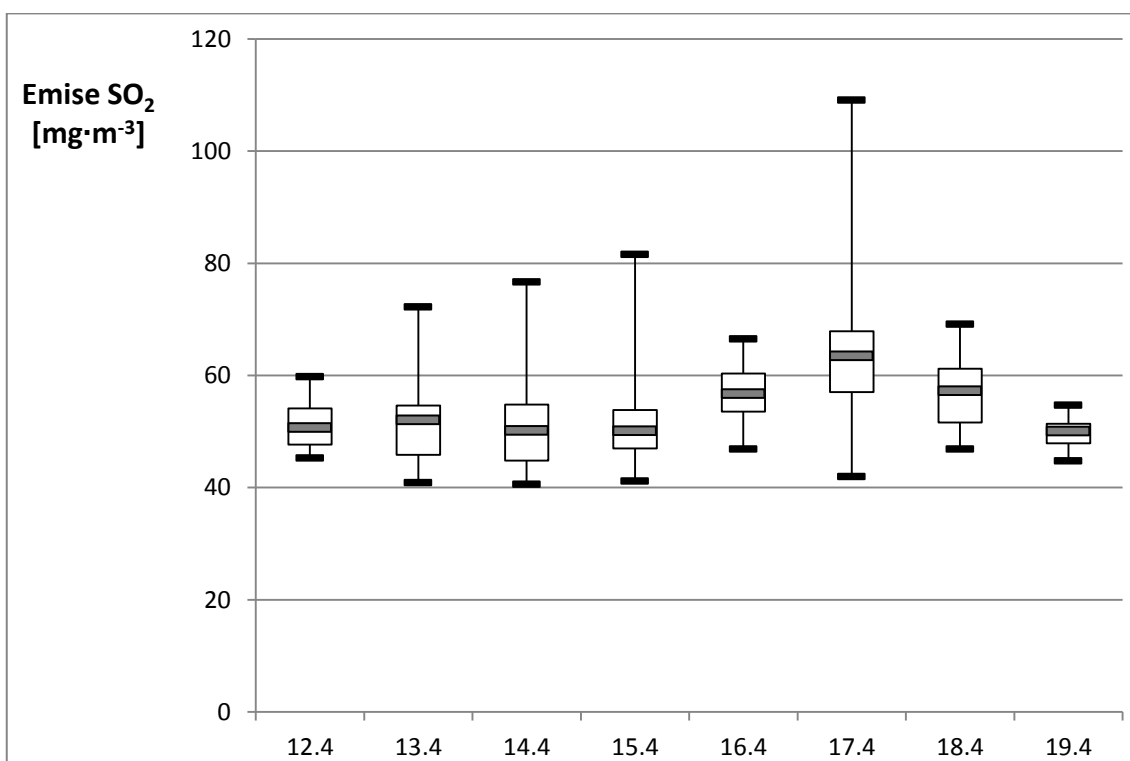
4.3.4.2 Výsledky kontinuálních měření emisí SO₂ za odsiřovací linkou

Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]	Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]	Datum a čas	SO ₂ [mg·m ⁻³]
12.4.2018 16:00	47,51	13.4.2018 9:00	57,13	14.4.2018 2:00	69,52
12.4.2018 16:30	58,88	13.4.2018 9:30	58,41	14.4.2018 2:30	64,25
12.4.2018 17:00	59,79	13.4.2018 10:00	55,91	14.4.2018 3:00	58,97
12.4.2018 17:30	57,00	13.4.2018 10:30	57,38	14.4.2018 3:30	56,59
12.4.2018 18:00	53,91	13.4.2018 11:00	52,81	14.4.2018 4:00	54,81
12.4.2018 18:30	54,23	13.4.2018 11:30	56,41	14.4.2018 4:30	53,03
12.4.2018 19:00	52,87	13.4.2018 12:00	54,14	14.4.2018 5:00	52,61
12.4.2018 19:30	48,84	13.4.2018 12:30	54,66	14.4.2018 5:30	49,27
12.4.2018 20:00	51,63	13.4.2018 13:00	54,11	14.4.2018 6:00	51,39
12.4.2018 20:30	51,49	13.4.2018 13:30	54,44	14.4.2018 6:30	55,9
12.4.2018 21:00	48,22	13.4.2018 14:00	51,98	14.4.2018 7:00	54,85
12.4.2018 21:30	49,99	13.4.2018 14:30	52,35	14.4.2018 7:30	53,65
12.4.2018 22:00	46,53	13.4.2018 15:00	52,20	14.4.2018 8:00	48,81
12.4.2018 22:30	48,41	13.4.2018 15:30	50,49	14.4.2018 8:30	49,38
12.4.2018 23:00	46,00	13.4.2018 16:00	46,50	14.4.2018 9:00	50,85
12.4.2018 23:30	45,28	13.4.2018 16:30	47,29	14.4.2018 9:30	50,59
13.4.2018 0:00	47,13	13.4.2018 17:00	51,97	14.4.2018 10:00	49,88
13.4.2018 0:30	54,02	13.4.2018 17:30	53,17	14.4.2018 10:30	45,27
13.4.2018 1:00	53,75	13.4.2018 18:00	55,86	14.4.2018 11:00	45,94
13.4.2018 1:30	55,91	13.4.2018 18:30	48,84	14.4.2018 11:30	43,65
13.4.2018 2:00	55,44	13.4.2018 19:00	46,85	14.4.2018 12:00	42,31
13.4.2018 2:30	53,70	13.4.2018 19:30	46,54	14.4.2018 12:30	40,63
13.4.2018 3:00	54,66	13.4.2018 20:00	46,62	14.4.2018 13:00	40,97
13.4.2018 3:30	52,02	13.4.2018 20:30	43,43	14.4.2018 13:30	44,7
13.4.2018 4:00	45,64	13.4.2018 21:00	44,82	14.4.2018 14:00	45,81
13.4.2018 4:30	41,16	13.4.2018 21:30	45,11	14.4.2018 14:30	47,81
13.4.2018 5:00	41,42	13.4.2018 22:00	52,16	14.4.2018 15:00	46,91
13.4.2018 5:30	40,89	13.4.2018 22:30	58,19	14.4.2018 15:30	48,67
13.4.2018 6:00	44,51	13.4.2018 23:00	70,33	14.4.2018 16:00	51,29
13.4.2018 6:30	43,49	13.4.2018 23:30	72,24	14.4.2018 16:30	53,71
13.4.2018 7:00	42,73	14.4.2018 0:00	76,72	14.4.2018 17:00	54,77
13.4.2018 7:30	43,11	14.4.2018 0:30	75,11	14.4.2018 17:30	54,01
13.4.2018 8:00	44,91	14.4.2018 1:00	76,06	14.4.2018 18:00	57,72
13.4.2018 8:30	51,30	14.4.2018 1:30	74,59	14.4.2018 18:30	53,16

Tab. 24. Výřez hodnot kontinuálního měření SO₂ za ODS



Graf 18. Grafické zpracování kontinuálního měření emisí SO₂ za ODS



Graf 19. Statistické zpracování kontinuálního měření emisí SO₂ za ODS

4.3.4.3 Kalibrace kontinuálních měření SO₂

Kalibrace byla prováděna souběžným měřením SO₂, kde AMS je měřicí stanice a NRM je normovaná referenční hodnota zjištěna v měřícím voze HORIBA.

Naměřené hodnoty koncentrací SO₂:

Pořadové číslo měření [i]	Výsledek AMS	Výsledek NRM	Rozdíl	Rozdíl	Čtverec rozdílů
	$\hat{y}_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	$y_{i,s}$ [mg·m ⁻³]	$D_i = y_{i,s} - \hat{y}_{i,s}$	$D_i - D_{prum}$	$(D_i - D_{prum})^2$
1	174	190	16	-3,50	12,25
2	196	215	19	-0,50	0,25
3	188	207	19	-0,50	0,25
4	237	260	23	3,50	12,25
5	184	203	19	-0,50	0,25
6	207	228	21	1,50	2,25
Průměr			19,5		
Součet					27,50

Tab. 25. Naměřené hodnoty koncentrací SO₂ měřicí stanicí a vozem HORIBA

Naměřené hodnoty jsou přepočítány na suché spaliny při teplotě 0°C a tlaku 101 325 Pa a obsahu kyslíku 6 %. Nejprve byl proveden test variability:

Pro získání směrodatné odchylky byly dosazeny hodnoty do vztahu (69):

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (D_i - D_{prum})^2} = \sqrt{\frac{27,5}{5}} = 2,35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Poté byl proveden test variability dle vztahu (71):

$$\sigma_o = \frac{p \cdot E}{1,96} = \frac{0,20 \cdot 500}{1,96} = 51,00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

a vztahu (71):

$$S_D \leq 1,5 \cdot \sigma_o \cdot k_v$$

$$2,35 \leq 1,50 \cdot 51,00 \cdot 0,9329$$

$$2,35 \leq 71,37$$

Z uvedeného vyplývá, že měřicí stanice vyhovuje podmínkám testu.

Následně byla provedena kontrola platnosti kalibrační funkce, která je pro stanici ABB AO 2000 pro měření oxidů síru nastavena dle ČSN EN 14 181:

$$\hat{y} = -175,395 + 43,865 \cdot x_i$$

kde \hat{y} je hodnota množství SO₂ v mg.m⁻³ a x_i hodnota proudu na výstupu v mA.

Ověření proběhlo dle vzorce (72):

$$19,5 \leq 2,015 \cdot \left(\frac{2,35}{2,449}\right) + 51,0$$

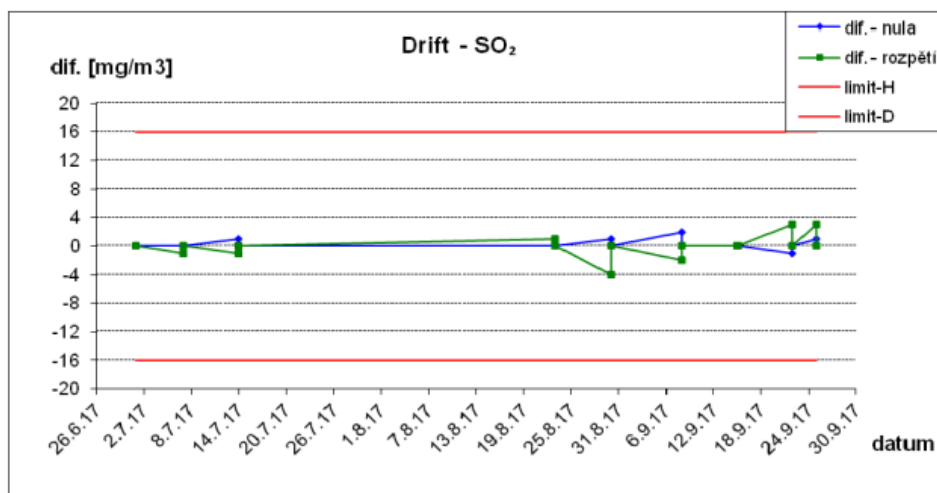
$$19,5 \leq 52,9$$

Ověření tedy potvrdilo správně zvolenou kalibrační funkci.

Při průběhu testu linearity byly požadované hodnoty koncentrace SO₂ připraveny z plynu o koncentraci 3200 mg.m⁻³ SO₂ v N₂. Test linearity kalibrační funkce potvrdil její správnost.

Test linearity kalibrační funkce potvrdil její správnost.

Při kontrole nulového bodu a rozpětí byly prověřeny hodnoty z týdenních kalibrací:



Graf 20. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace SO₂

složka	: SO ₂				
rozsah	: 0 - 800 mg/m ³				
připustný drift	: 16 mg/m ³ (2 % z rozsahu)				
Datum	Ref.-nula	Čtení-nula	Ref.-rozpětí	Čtení-rozpětí	Dif.-rozpětí
1. 7. 2017		0			0
7. 7. 2017	0	0	502	501	-1
7. 7. 2017		0			0
14. 7. 2017	0	1	502	501	-1
14. 7. 2017		0			0
23. 8. 2017	0	0	502	503	1
23. 8. 2017		0			0
30. 8. 2017	0	1	502	498	-4
30. 8. 2017		0			0
8. 9. 2017	0	2	502	500	-2
8. 9. 2017		0			0
15. 9. 2017	0	0	502	502	0
15. 9. 2017		0			0
22. 9. 2017	0	-1	502	505	3
22. 9. 2017		0			0
25. 9. 2017	0	1	502	505	3
25. 9. 2017		0			0

Tab. 26. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace koncentrace SO₂

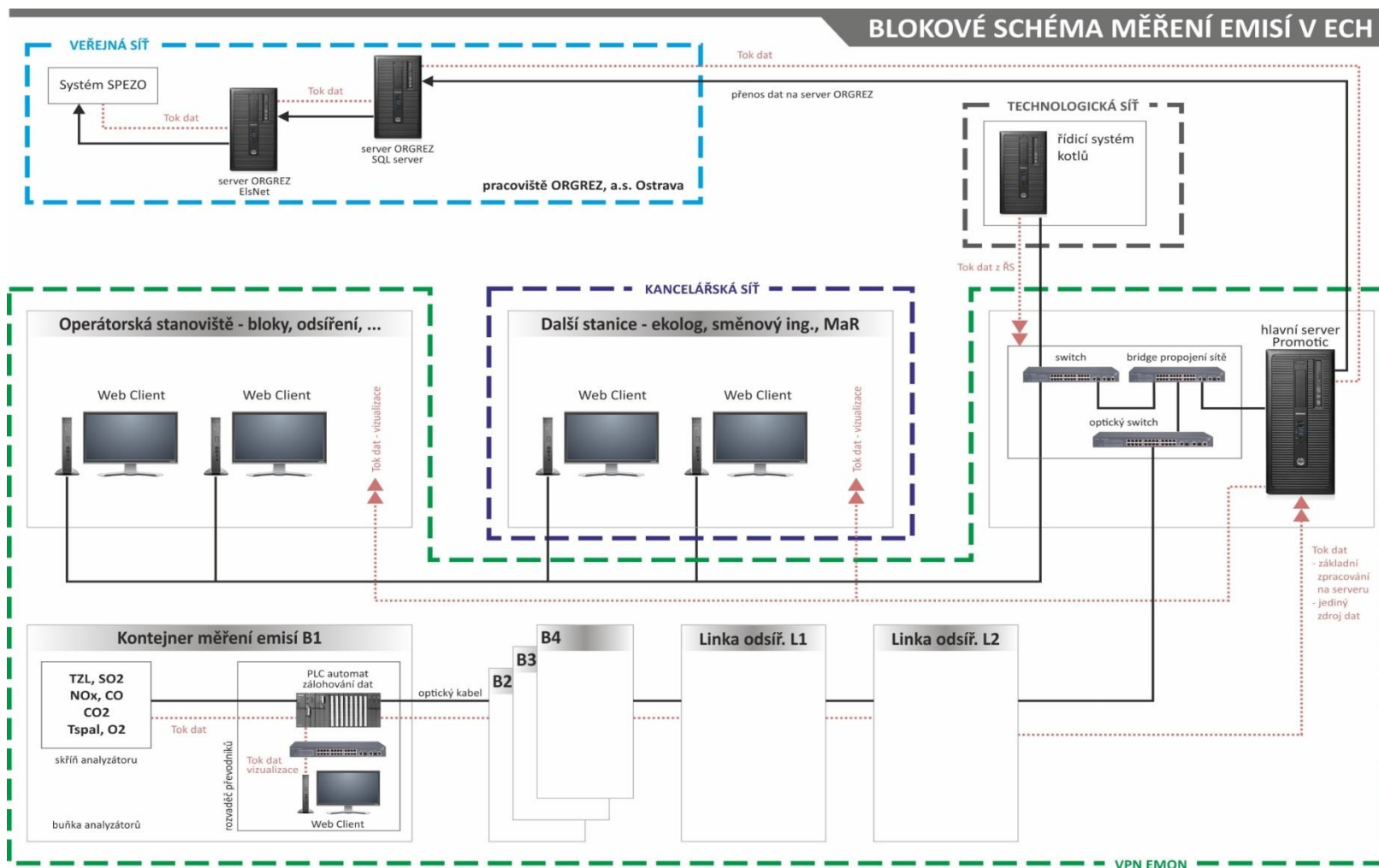
Měřicí stanice tedy splňuje požadavky pro kontinuální měření SO₂.

4.3.5 Monitorování, záznam a vyhodnocování emisních měření

Vyhodnocovací systém PROMOTIC je distribuovaný systém pro monitorování, záznam a analýzu emisních měření na všech kotlích uhelných elektráren ČEZ, a.s. včetně Elektrárny Chvaletice, a je v souladu s legislativou ČR.

Stanice rozmístěné po elektrárně v blízkosti zdrojů signálů a pracovní stanice systému komunikují v rámci počítačové sítě LAN elektrárny. Operátoři na elektrárně mohou používat aplikaci Systému PROMOTIC ke sledování probíhajících měření a dalších aplikaci pro analýzu historie, kterékoli stanici připojené k elektrárenské počítačové síti. Aplikace pracují i na dálku v rámci sítě ČEZNet.

V blízkosti skříní analyzátorů jsou nainstalovány rozvaděče se snímacími PLC (ICP DAS, IP8847). Každé PLC je vybaveno 8 pozicemi pro rozšiřující karty. Rozvaděč obsahuje ethernetový switch s možností připojení optické sítě, zálohu napájení PLC, potřebné galvanické oddělovače a potřebné propojovací a ochranné prvky signálů. V případě výpadku komunikace mezi PLC a vyhodnocovacím serverem probíhá záloha snímaných dat až do doby zprovoznění komunikace.



Obr. 27. Blokové schéma měření emisí v 7EC

Přehled snímaných analogových veličin:

- měření koncentrace SO₂, NO, CO, CO₂
- měření koncentrace O₂
- měření koncentrace TZL
- měření teploty spalin

Přehled snímaných binárních veličin:

- signály poruch – sondy, odběrové hadice, chladničky vzorku, vlhkosti ve vzorku, průtoku, analyzátorů, hladiny kondenzátu,
- signál údržby analyzátorů a signál kalibrace
- signál poruchy měření koncentrace TZL, signál kalibrace TZL a signál údržby měření
- signály rozsahu měření koncentrace SO₂, koncentrace NO, koncentrace CO

Do rozvaděčů u skříní analyzátorů jsou nainstalovány zobrazovací PC s dotykovým panelem a operačním systémem Windows 7. Na těchto PC je možno pomocí webových klientů sledovat stav měření všech sběrných míst.

Server vyhodnocovacího systému přijímá data ze všech jednotek PLC elektrárny. Jako vizualizační systém pro vyhodnocovací stanici je použit systém SCADA PROMOTIC®. Ve vyhodnocovacím systému probíhá základní verifikace a zobrazení údajů v jednotlivých operátorských obrazech. Dále je zde prováděno základní statistické zpracování dat a veškerá data jsou průběžně v půlhodinových intervalech ukládána na server na pracovišti ORGREZ, Ostrava pro potřeby vyhodnocovacího systému EisNet. Systém souběžně ukládá data i do lokálního serveru SQL. Celý vyhodnocovací systém je řešen jako systém modulární, který lze bez problémů a podle potřeby odběratele nebo změny legislativy snadno upravovat.

Vyhodnocovací stanice s vizualizačním systémem (hlavní server Promotic) plní následující funkce:

- snímání všech údajů s jednotlivých PLC
- provádí základní verifikaci naměřených hodnot
- provádí přepočty naměřených hodnot na fyzikální veličiny
- zobrazuje přepočtené fyzikální hodnoty
- provádí základní statistické zpracování pro program EisNet
- ukládá údaje do databází pro program EisNet
- provádí přepočty koncentrací škodlivin na referenční stav
- provádí kontrolu plnění emisních limitů
- vytváří a zobrazuje systém prognóz pro jednotlivé koncentrace
- vytváří historické trendy naměřených hodnot
- vede seznam alarmů a eventů (událostí)
- zabezpečuje komunikace s operátorskými stanicemi monitorovacího systému pomocí integrovaného webového serveru

Vyhodnocovací systém emisního monitorovacího systému umožňuje evidenci poruchových provozních stavů zařízení způsobujících zvýšenou tvorbu emisí a překročení emisních limitů (popř. zvolených násobků emisních limitů), které odpovídají platnému Provoznímu řádu.

Systém volby a vkládání poruchových stavů je řešen tak, že když dojde k překročení emisního limitu (popř. zvolených násobků emisních limitů) půlhodinových referenčních koncentrací jednotlivých škodlivin, bude pro obsluhu zobrazena tabulka s příslušnými koncentracemi škodlivin a s možností výběru příslušného poruchového provozního stavu zařízení. Tyto stavy jsou vybírány obsluhou zařízení a musí souhlasit s platným Provozním řádem.

Výše zmíněné vybrané provozní stavy jsou zapisovány do příslušné databáze, dále jsou zpracovány vyhodnocovacím systémem EisNet a jsou zohledněny v příslušných emisních protokolech týkajících se požadavků na plnění emisních limitů. Systém umožňuje vyvolání tabulkového zobrazení těchto vybraných provozních stavů s možností zpětné editace a případného doplnění provozních stavů k nezdůvodněným překročením daných násobků emisních limitů.

Všechny měřené hodnoty jsou v celém průběhu zpracování doprovázeny příznakem (stavovou hodnotou), jehož hodnota se mění na základě daného stavu, v jakém se nachází dané emisní měření. Při výskytu vícenásobných chyb se jednotlivé příznaky sčítají. Údaj, u kterého je příznak různý od nuly (indikace neplatnosti údaje), nevstupuje do dalších výpočtů a nemá vliv na konečné zpracování.

Vyhodnocovací systém přebírá z technologických automatů měřené veličiny v intervalu cca 2-3 sekund a následně je průběžně přepočítává na fyzikální jednotky. Takto získané hodnoty zpracovává do minutových průměrů. Za platný minutový údaj je považován průměr, který byl vypočten z minimálně 10 naměřených hodnot s příznakem verifikace 0. Dále program z takto získaných hodnot vypočte půlhodinový průměr, do něhož vstupují jen „bezporuchové“ minutové průměry (časové období, během kterého nebyly přístroje v poruše, v údržbě a ani v té době neprobíhala kalibrace). Tento půlhodinový průměr je považován za platný, pokud je vytvořen minimálně z 20 minutových hodnot. Tyto průměry lze sledovat pomocí editoru historických trendů a ukládají se také do příslušných databází určených pro následné zpracování. Hlavní program vyhodnocovacího systému měření na centrálním serveru neřeší následné zpracování, toto je řešeno prostřednictvím systému EisNet, který vytváří veškeré požadované emisní protokoly a výkazy. Souběžně jsou tímto hlavním programem Promotic ukládána veškerá potřebná data na lokální server SQL a taktéž na server SQL na pracovišti ORGREZ, a.s. Ostrava, odkud jsou data načítána a dále zpracovávána vyhodnocovacím systémem EisNet.

Obsluha má k dispozici jednotlivé vizualizační obrazovky, ve kterých se pohybuje prostřednictvím příslušných tlačítek. Po inicializaci systému se zobrazí úvodní obrazovka, která umožňuje volby pro zobrazení jednotlivých operátorských obrazovek pro všechna emisní měření.

Úvodní obrazovka zobrazuje základní schematický přehled všech emisních měření v rámci dispozičního řešení na elektrárně pro kotle K1 až K4 a pro obě odsiřovací linky. U všech míst měření emisí jsou průběžně zobrazovány koncentrace měřených škodlivin a všechny jsou v referenčním stavu (101.325 kPa, 0°C, stav suchý, referenční obsah kyslíku ve spalinách).

Tlačítko Kotel K1 (K2, K3, K4) přepne obrazovku na schéma kotle - elektrického odlučovače - odsiřovacího zařízení se zobrazením technologických veličin kotle a napájecích proudů EO.

Odsíření – přepnutí na základní obrazovku určenou pro operátora odsíření.

Eventy – (příznaky, události) přepnutí na systém historie evidovaných událostí, které jsou automaticky zaznamenávány a ukládány.

Alarmy – přepnutí na systém historie evidovaných alarmů, které jsou automaticky zaznamenávány a ukládány (porucha, kalibrace, údržba, komunikace).

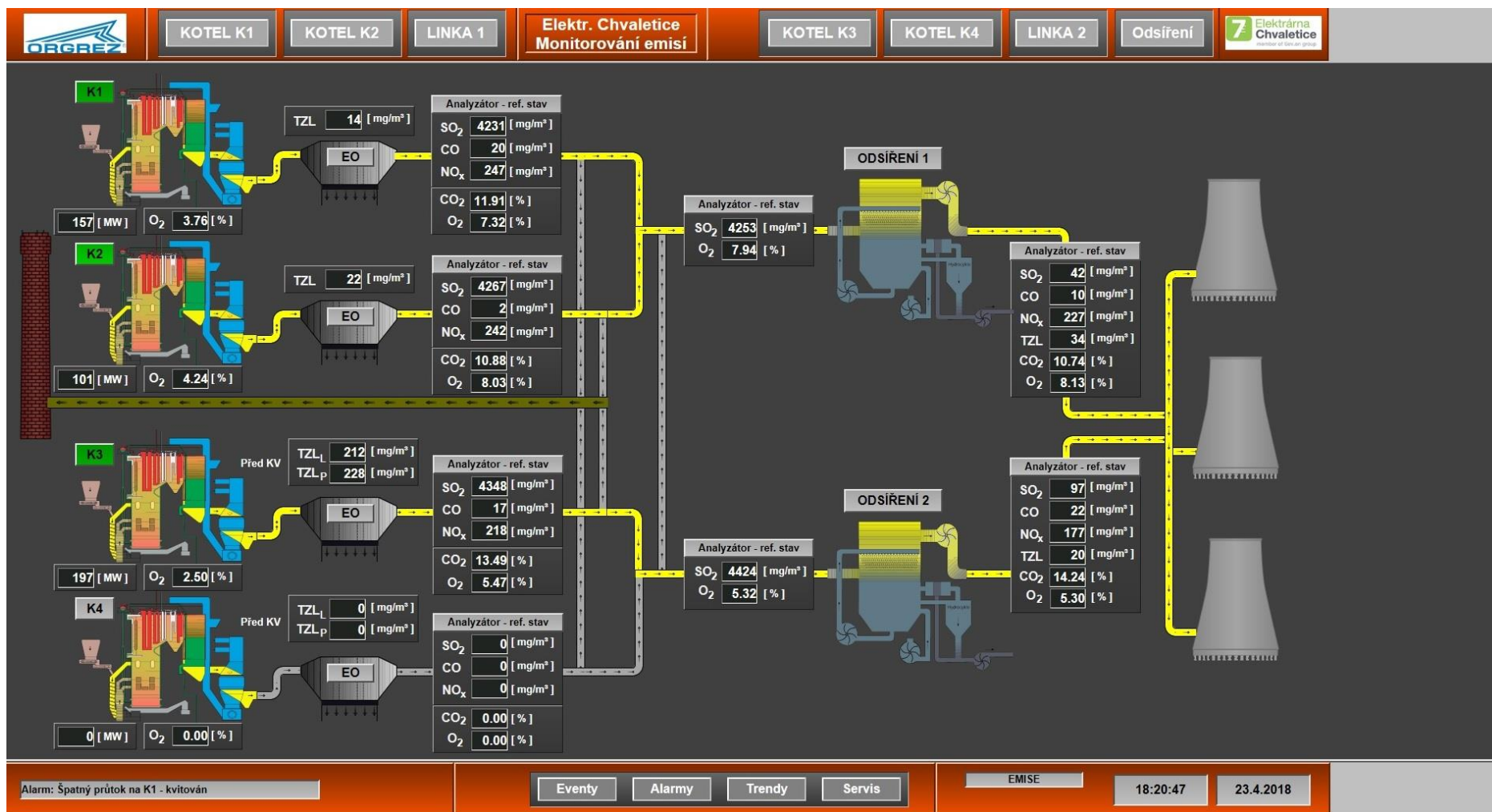
Trendy – přepnutí na systém historických trendů sloužících pro zpětné prohlížení požadovaných veličin.

Servis – přepnutí na obraz systému konstant a diagnostiky, sloužících pro servisní účely.

Analyzátor za EO (K1,K2,K3,K4) – přepnutí na schéma plynové odběrové trasy a úpravy vzorku analyzátoru měření koncentrací škodlivin za elektrickým odlučovačem pro jednotlivé kotle.

Analyzátor před odsířením (K1,K2,K3,K4) – přepnutí na schéma plynové odběrové trasy a úpravy vzorku analyzátoru měření plynných koncentrací škodlivin a prachoměru měřícího koncentrace tuhých znečišťujících látek mimo odsiřovací zařízení.

Analyzátor za odsířením – přepnutí na schéma plynové odběrové trasy a úpravy vzorku analyzátoru měření plynných koncentrací škodlivin a prachoměru měřícího koncentrace tuhých znečišťujících látek za odsiřovacím zařízením.



Obr. 28. Úvodní obrazovka systému měření emisí

4.3.6 Hmotnostní bilance emisí

Hmotnostní bilance byly vypočítány za pomoci součinu množství spalin a koncentrací polutantu v nich. Nejdříve je uvedena hmotnostní bilance meziproductů z jednotlivých bloků, po té bilance paliva a odloučeného popílku na elektrostatických odlučovačích a nakonec hmotnostní emisní bilance za odsiřovací linkou. Data byla sledována v roce 2016 a 2017.

Hmotnostní bilance meziproductů vysokoteplotního spalování uhlí za elektrostatickými odlučovači za rok 2016				
Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
1	I.	60315,95	986631,21	95984,70
	II.	64570,30	1257036,71	87527,49
	III.	70380,37	1490933,82	93735,19
	IV.	72086,22	1318806,25	97464,40
	V.	21304,84	404189,53	31540,11
	VI.	47779,15	1171873,38	83293,65
	VII.	48549,53	1337344,39	95249,57
	VIII.	51539,96	1136804,78	88982,61
	IX.			
	X.	34904,61	582752,36	45323,33
	XI.	87598,74	1246131,19	105388,20
	XII.	94568,03	1340777,09	101887,50

Tab. 28. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 1

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
2	I.	87775,35	856761,32	82691,66
	II.	68782,01	811185,64	62939,91
	III.	118811,58	1665136,15	111601,77
	IV.	107023,80	1337731,67	107390,90
	V.	22346,64	272369,68	22690,25
	VI.	89647,78	1282135,94	108399,54
	VII.	89240,52	1099776,65	91076,35
	VIII.	75582,92	1110022,52	91517,81
	IX.			
	X.	49102,14	472516,04	40998,09
	XI.	122563,55	1176261,00	113640,02
	XII.	150428,86	1344105,2	105785,60

Tab. 29. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 2

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
3	I.	94199,14	1065148,03	103700,21
	II.	68193,10	972457,43	82143,41
	III.	15602,02	233216,95	18074,04

Tab. 30. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 3

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
4	I.	74964,42	915598,43	87710,62
	II.	45153,14	779299,28	61953,12
	III.	76895,42	1516695,75	102853,37
	IV.	58012,61	1233298,14	99174,21

Tab. 31. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 4

Spotřeba paliva a produkce popílku v roce 2016			
Měsíc	Množství uhlí [t]	Obsah popela Ap [%]	Odloučený popel [t]
I.	226 680	21,14	49 004,93
II.	194 852	19,72	39 549,16
III.	217 518	19,54	43 624,07
IV.	196 231	18,09	43 762,91
V.	38 274	18,96	7 557,69
VI.	124 450	17,09	21 981,49
VII.	125 695	17,05	22 138,03
VIII.	124 792	16,71	21 654,85
IX.			
X.	63 087	17,38	11 384,66
XI.	163 060	17,94	30 305,49
XII.	156 991	18,24	29 690,60
Celkem	1 631 630		320 653,87

Tab. 32. Měsíční hmotnostní bilance paliva a odloučeného popílku v EO

Hmotnostní bilance emisí vysokoteplotního spalování uhlí za odsířovací linkou za rok 2016			
	linka ODS 1	linka ODS 2	Celkem
Spaliny [m ³]	5 869 702 823,61	2 797 454 807,72	8 667 157 631,32
TZL [kg]	151 085,16	70 520,22	221 605,38
SO ₂ [kg]	1 073 384,99	472 342,75	1 545 727,74
NO _x [kg]	1 521 278,23	818 792,00	2 340 070,23

Tab. 33. Hmotnostní bilance emisí za odsířením

Hmotnostní bilance meziproductů vysokoteplotního spalování uhlí za elektrostatickými odlučovači za rok 2017				
Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
1	I.	90258,59	1879423,37	107591,22
	II.	84617,05	1235967,68	92948,37
	III.	74719,24	1470478,91	107602,08
	IV.	75562,09	1537016,13	105335,08
	V.	68961,89	1731321,45	104791,68
	VI.	70225,44	1561388,04	101625,72
	VII.	18398,61	504668,89	28065,08
	VIII.	21625,29	467015,85	27023,65
	IX.	64666,62	1479293,8	89179,21
	X.	62715,75	1617964,16	92787,30
	XI.	66502,91	1700046,10	93781,94
	XII.	74161,39	1586812,66	102354,37

Tab. 34. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 1

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
2	I.	147230,02	1883510,59	100701,7
	II.	146630,04	1407376,15	92276,82
	III.	139947,69	1389072,04	87711,88
	IV.	119668,44	1325011,55	86740,14
	V.	23894,54	519005,64	36205,94
	VI.	98888,72	1286486,22	80588,83
	VII.	28749,60	432322,83	27258,82
	VIII.			
	IX.	60554,71	822654	46710,97
	X.	91130,54	1537739,04	85386,45
	XI.	100415,63	1781598,54	126901,86
	XII.	25028,69	288850,55	20450,14

Tab. 35. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 2

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
3	I.			
	II.	17783,41	98068,13	22251,55
	III.	20608,62	253879,21	23067,65
	IV.	63453,26	806020,58	56479,87
	V.	105226,66	1185481,42	78711,65
	VI.	45451,86	519810,42	26214,69
	VII.	133100,02	1612157,67	108330,71
	VIII.	122456,19	1525887,31	79780,27
	IX.	99901,20	1152274,89	62206,35
	X.	147143,62	1574777,63	88341,54
	XI.	117250,96	1634786,95	114153,61
	XII.	85582,41	1186111,80	84958,00

Tab. 36. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 3

Blok č.	měsíc	TZL [kg]	SO ₂ [kg]	NO _x [kg]
4	VI.	4203,37	8339,68	1904,93
	VII.	1164,40	26060,53	4812,40
	VIII.	16874,91	867199,72	67193,59
	IX.	28398,74	1033824,83	74676,54
	X.	60664,25	1434987,38	90489,03
	XI.	68353,81	1532966,76	105450,18
	XII.	22700,61	465641,01	36049,72

Tab. 37. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 4

Spotřeba paliva a produkce popílku v roce 2017			
Měsíc	Množství uhlí [t]	Obsah popela Ap [%]	Odloučený popel [t]
I.	169 752	17,94	31 321,17
II.	153 873	20,04	32 442,50
III.	160 981	18,20	30 383,93
IV.	195 353	18,04	36 356,71
V.	169 685	19,10	33 709,64
VI.	163 234	18,79	31 978,74
VII.	117 502	17,26	21 031,46
VIII.	135 711	19,63	28 348,65
IX.	218 398	19,57	44 397,69
X.	272 108	18,36	51 595,32
XI.	290 061	18,17	54 392,75
XII.	172 227	19,92	35 528,45
Celkem	2 218 885		431 487,00

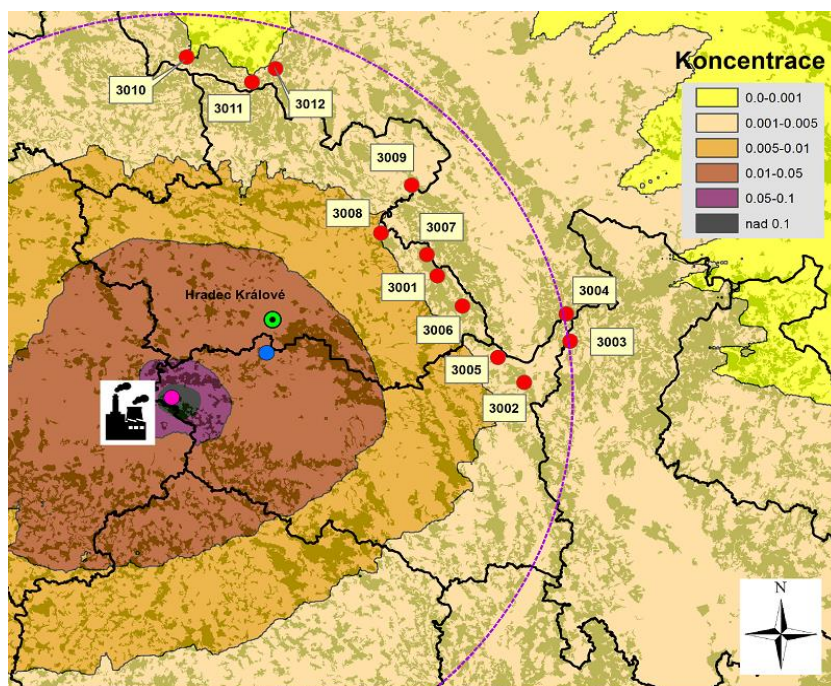
Tab. 38. Měsíční hmotnostní bilance paliva a odloučeného popílku v EO

Hmotnostní bilance emisí vysokoteplotního spalování uhlí za odsiřovací linkou za rok 2017			
	linka ODS 1	linka ODS 2	Celkem
Spaliny [m ³]	7 141 434 780,81	4 727 539 348,98	11 868 974 129,79
TZL [kg]	122 515,23	105 565,64	228 080,87
SO ₂ [kg]	988 030,02	555 562,39	1 543 592,41
NO _x [kg]	1 709 518,40	1 091 407,14	2 800 925,54

Tab. 39. Hmotnostní bilance emisí za odsiřením

4.4 Výsledky modelování rozptýlu emisí pomocí SYMOS'97, verze 2013

4.4.1 Modelování emisí PM₁₀, elektrárna Chvaletice

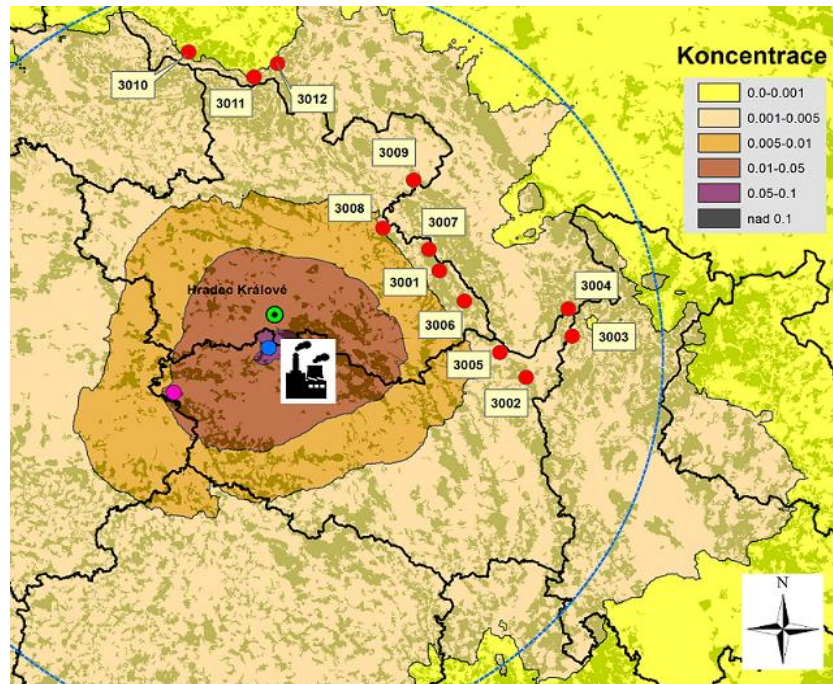


Obr. 29. Modelace PM₁₀ z elektrárny Chvaletice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Maximální koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
3001	3599450	5575558	1015	0,0037	0,9163
3002	3621341	5547971	738	0,0034	0,6588
3003	3632865	5558659	968	0,0027	0,6323
3004	3631929	5565712	1049	0,0023	0,4393
3005	3614726	5554413	667	0,0041	0,8842
3006	3605736	5567770	898	0,0039	0,9351
3007	3596806	5581056	894	0,0037	0,8895
3008	3585250	5586594	569	0,0046	1,0855
3009	3592989	5598946	647	0,0034	0,8605
3010	3536377	5632112	787	0,0015	0,2186
3011	3552770	5625670	957	0,0013	0,1776
3012	3558729	5629131	545	0,0013	0,1886

Tab. 40. Imisní příspěvky PM₁₀ elektrárny Chvaletice v referenčních bodech

4.4.2 Modelování emisí PM₁₀, elektrárna Opatovice

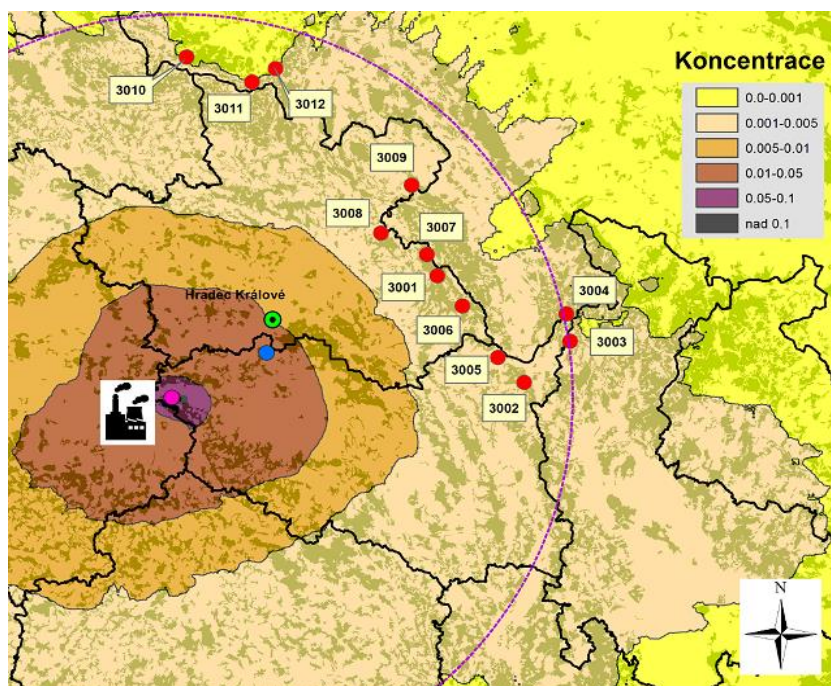


Obr. 30. Modelace PM₁₀ z elektrárny Opatovice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Maximální koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
3001	3599450	5575558	1015	0,0038	0,8771
3002	3621341	5547971	738	0,0028	0,4861
3003	3632865	5558659	968	0,0022	0,4767
3004	3631929	5565712	1049	0,0020	0,3907
3005	3614726	5554413	667	0,0038	0,7875
3006	3605736	5567770	898	0,0040	0,9163
3007	3596806	5581056	894	0,0037	0,8271
3008	3585250	5586594	569	0,0047	1,0884
3009	3592989	5598946	647	0,0030	0,7674
3010	3536377	5632112	787	0,0008	0,0999
3011	3552770	5625670	957	0,0012	0,1908
3012	3558729	5629131	545	0,0011	0,1616

Tab. 41. Imisní příspěvky PM₁₀ elektrárny Opatovice v referenčních bodech

4.4.3 Modelování emisí PM_{2,5}, elektrárna Chvaletice

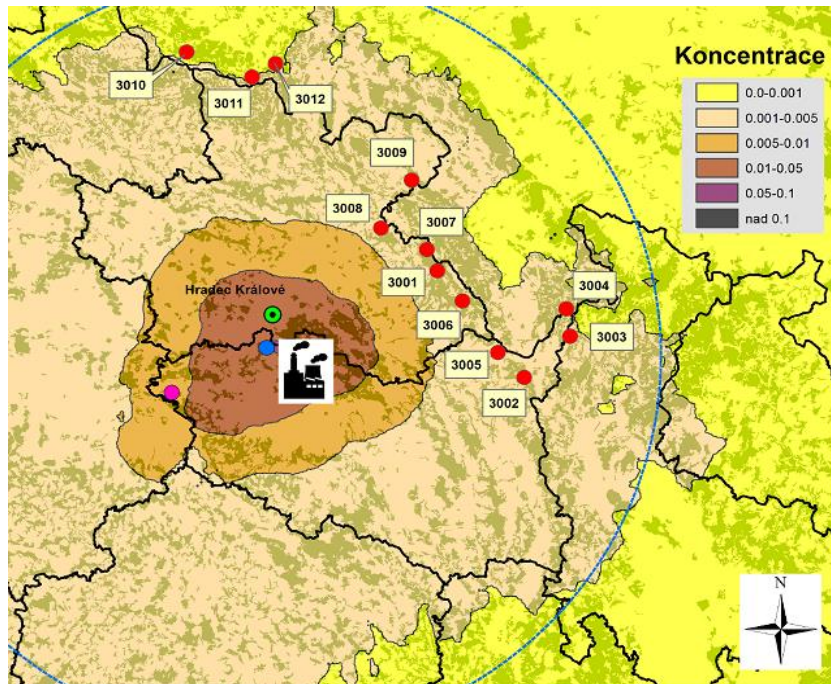


Obr. 31. Modelace PM_{2,5} z elektrárny Chvaletice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Maximální koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
3001	3599450	5575558	1015	0,0024	0,5928
3002	3621341	5547971	738	0,0022	0,4262
3003	3632865	5558659	968	0,0017	0,4091
3004	3631929	5565712	1049	0,0015	0,2842
3005	3614726	5554413	667	0,0026	0,5721
3006	3605736	5567770	898	0,0025	0,6050
3007	3596806	5581056	894	0,0024	0,5755
3008	3585250	5586594	569	0,0030	0,7023
3009	3592989	5598946	647	0,0022	0,5567
3010	3536377	5632112	787	0,0010	0,1414
3011	3552770	5625670	957	0,0009	0,1149
3012	3558729	5629131	545	0,0009	0,1220

Tab. 42. Imisní příspěvky PM_{2,5} elektrárny Chvaletice v referenčních bodech

4.4.4 Modelování emisí PM_{2,5}, elektrárna Opatovice

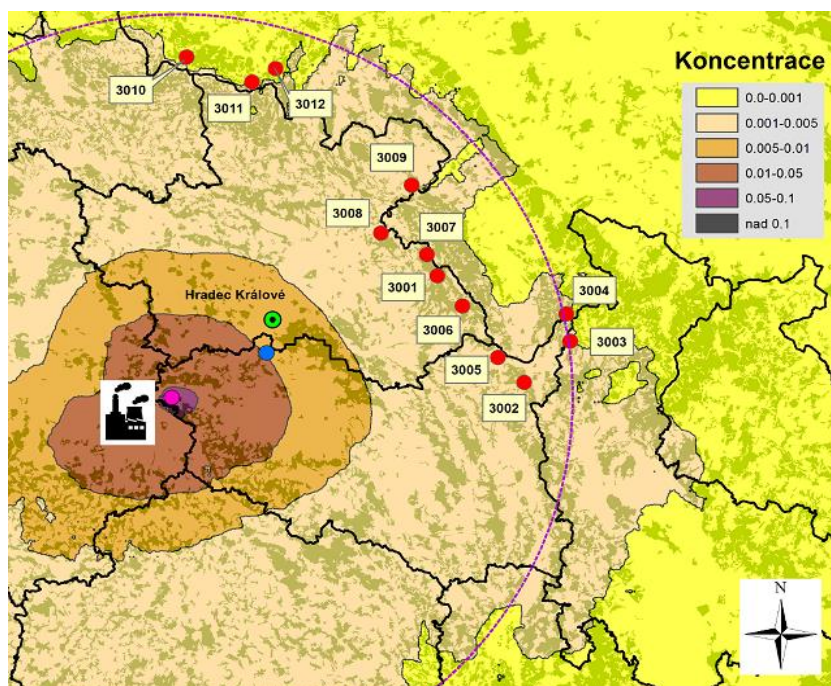


Obr. 32. Modelace imisí PM_{2,5} z elektrárny Opatovice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Maximální koncentrace [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
3001	3599450	5575558	1015	0,0029	0,6578
3002	3621341	5547971	738	0,0021	0,3645
3003	3632865	5558659	968	0,0016	0,3575
3004	3631929	5565712	1049	0,0015	0,2930
3005	3614726	5554413	667	0,0028	0,5907
3006	3605736	5567770	898	0,0030	0,6872
3007	3596806	5581056	894	0,0028	0,6203
3008	3585250	5586594	569	0,0035	0,8163
3009	3592989	5598946	647	0,0022	0,5755
3010	3536377	5632112	787	0,0006	0,0749
3011	3552770	5625670	957	0,0009	0,1431
3012	3558729	5629131	545	0,0008	0,1212

Tab. 43. Imisní příspěvky PM_{2,5} elektrárny Opatovice v referenčních bodech

4.4.5 Modelování emisí Hg, elektrárna Chvaletice

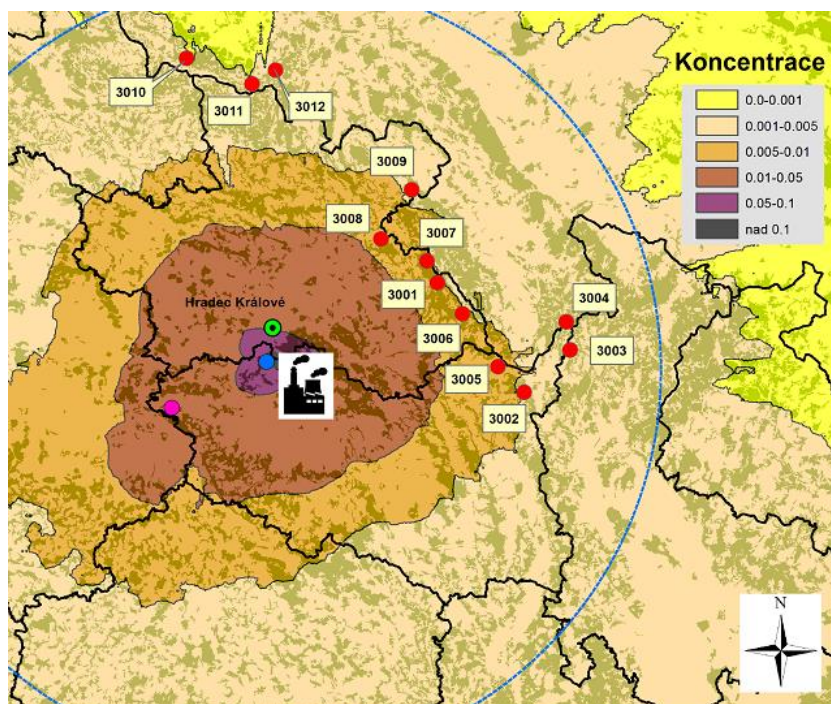


Obr. 33. Modelace Hg z elektrárny Chvaletice [ng·m⁻³]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]
3001	3599450	5575558	1015	0,0017	0,4188
3002	3621341	5547971	738	0,0015	0,3011
3003	3632865	5558659	968	0,0012	0,2890
3004	3631929	5565712	1049	0,0010	0,2008
3005	3614726	5554413	667	0,0019	0,4041
3006	3605736	5567770	898	0,0018	0,4274
3007	3596806	5581056	894	0,0017	0,4065
3008	3585250	5586594	569	0,0021	0,4961
3009	3592989	5598946	647	0,0015	0,3933
3010	3536377	5632112	787	0,0007	0,0999
3011	3552770	5625670	957	0,0006	0,0812
3012	3558729	5629131	545	0,0006	0,0862

Tab. 44. Imisní příspěvky Hg elektrárny Chvaletice v referenčních bodech

4.4.6 Modelování emisí Hg, elektrárna Opatovice



Obr. 34. Modelace Hg z elektrárny Opatovice [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]

Č. ref. bodu	X-ová souřadnice ref. bodu	Y-ová souřadnice ref. bodu	n.m. výška ref. bodu [m]	Průměrná koncentrace [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]	Maximální koncentrace [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$]
3001	3599450	5575558	1015	0,0061	1,3970
3002	3621341	5547971	738	0,0045	0,7742
3003	3632865	5558659	968	0,0035	0,7592
3004	3631929	5565712	1049	0,0031	0,6222
3005	3614726	5554413	667	0,0060	1,2544
3006	3605736	5567770	898	0,0064	1,4594
3007	3596806	5581056	894	0,0059	1,3173
3008	3585250	5586594	569	0,0074	1,7335
3009	3592989	5598946	647	0,0047	1,2222
3010	3536377	5632112	787	0,0012	0,1591
3011	3552770	5625670	957	0,0019	0,3039
3012	3558729	5629131	545	0,0018	0,2574

Tab. 45. Imisní příspěvky Hg elektrárny Opatovice v referenčních bodech

4.4.7 Modelování emisí těžkých kovů, elektrárna Chvaletice

Č. ref. bodu	As		Cd		Pb	
	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]
3001	0,0012	0,2932	0,0002	0,0477	0,0078	1,8997
3002	0,0011	0,2109	0,0002	0,0343	0,0070	1,3659
3003	0,0009	0,2024	0,0001	0,0329	0,0056	1,3109
3004	0,0007	0,1406	0,0001	0,0228	0,0047	0,9107
3005	0,0013	0,2830	0,0002	0,0460	0,0084	1,8332
3006	0,0012	0,2993	0,0002	0,0486	0,0081	1,9388
3007	0,0012	0,2847	0,0002	0,0463	0,0077	1,8441
3008	0,0015	0,3474	0,0002	0,0565	0,0096	2,2506
3009	0,0011	0,2754	0,0002	0,0447	0,0070	1,7840
3010	0,0005	0,0700	0,0001	0,0114	0,0031	0,4532
3011	0,0004	0,0568	0,0001	0,0092	0,0028	0,3682
3012	0,0004	0,0604	0,0001	0,0098	0,0027	0,3911

Tab. 46. Imisní příspěvky těžkých kovů elektrárny Chvaletice v referenčních bodech

4.4.8 Modelování emisí těžkých kovů, elektrárna Opatovice

Č. ref. bodu	As		Cd		Pb	
	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]	Průměrná koncentrace [ng·m ⁻³]	Maximální koncentrace [ng·m ⁻³]
3001	0,0008	0,1768	0,0024	0,5482	0,0050	1,1494
3002	0,0006	0,0980	0,0018	0,3038	0,0037	0,6370
3003	0,0004	0,0961	0,0014	0,2979	0,0029	0,6247
3004	0,0004	0,0788	0,0012	0,2442	0,0026	0,5120
3005	0,0008	0,1588	0,0024	0,4922	0,0049	1,0321
3006	0,0008	0,1847	0,0025	0,5727	0,0052	1,2008
3007	0,0007	0,1667	0,0023	0,5169	0,0049	1,0838
3008	0,0009	0,2194	0,0029	0,6802	0,0061	1,4263
3009	0,0006	0,1547	0,0019	0,4796	0,0039	1,0056
3010	0,0002	0,0201	0,0005	0,0624	0,0010	0,1309
3011	0,0002	0,0385	0,0007	0,1192	0,0016	0,2500
3012	0,0002	0,0326	0,0007	0,1010	0,0015	0,2118

Tab. 47. Imisní příspěvky těžkých kovů elektrárny Opatovice v referenčních bodech

5 Diskuze a závěry

Měření NO_x s technologií SNCR a bez ní bylo provedeno na dvou typově stejných kotlích se stejným palivem. Správnost měření NO_x je pravidelně kontrolována jednou týdně kalibračním plynem a jednou ročně porovnáním hodnot s autorizovaným přístrojem, viz kapitola 4.3.2.3.

Porovnáním hodnot z grafu č. 4., 5., 6. a 7. lze odvodit, že účinnost sekundární denitrifikace dosahuje v sledovaném období hodnoty 33 %. Pro dosažení limitů platných od roku 2021, kdy roční průměr u zdrojů nad 300 MW_t nesmí přesáhnout $175 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$, se tedy nelze spoléhat pouze na současný stav a je nutné zavádět další opatření pro snižování emisí NO_x .

V 7EC probíhá další zintenzivnění technologie SNCR zaváděním online měření teplotních polí ve spalovací komoře kotle. Doposud je vstřikování močoviny řízeno pouze výkonem kotle, kterému ale vždy neodpovídá původně naměřené rozložení teplotních polí [34], další vliv na něj má počet provozovaných práškových hořáků a aktuální složení paliva. Okamžitá měření teploty, s vlivem na regulaci vstřikování močoviny, tento nedostatek odstraňuje. Dalším krokem ke snížení emisí NO_x je doplňování primárních opatření popsanych v kapitole 2.2.2. Je prováděna úprava spalování modifikací práškových hořáků a montáží dalších pater dohořívacích vzduchů.

Měření emisí TZL bylo provedeno na dvou rozdílných technologiích odlučování částic TZL. První technologie pracuje na principu tkaninových filtrů a druhá používá elektrostatické filtry. Přestože každá technologie je umístěna v jiné elektrárně, které se liší výkonovými parametry, koncentrace TZL v kouřových plynech jsou porovnatelné. Správnost měření je ověřována jednou ročně porovnáním s gravimetrickou metodou viz kapitola 4.3.3.4.

Při porovnání emisí TZL za elektrostatickými filtry s odsiřovací linkou a tkaninovými filtry dle grafů 9., 10. a 13., 14. výsledky jednoznačně vykazují vyšší účinnost technologie tkaninových filtrů, které již nyní splňují budoucí emisní limity $8 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$. Přestože je jejich účinnost vysoká, stále sebou přinášejí řadu nevýhod v podobě náročnější údržby, nutnost instalace výkonnějších kouřových ventilátorů, vysokou citlivosti na teplotu spalin, nutnost ekonomicky nákladné pravidelné výměny rukávů a v neposlední řadě malé zkušenosti s provozováním na výkonných zdrojích.

Elektrostatické filtry je možné provozovat i po roce 2021, pokud dojde ke zvýšení jejich odlučivosti novými úpravami. V 7EC je nyní prováděna instalace nových pulzních zdrojů pro zvýšení úrovně napájení elektrod se současnou eliminací vzniku elektrických přeskoků. Dále bylo provedeno měření rozložení spalin při průchodu přes aktivní zónu EO a z toho vyplývající instalace usměrňovačů proudění plynu na vstupní části s následným rovnoměrným zatížením odlučovače v celém jeho průřezu. Tato opatření zaručí výstupní hodnotu koncentrace poléťavého prachu na hodnotu do $20 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ při vstupu $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Při porovnání grafů 11., 12. a 13., 14. je zřejmé, že odsíření také plní funkci dalšího odlučovače TZL s účinností až 90 % a z toho vyplývající předpoklad o

bezproblémovém plnění nových limitů po zprovoznění předchozích opatření. Jako doplňující opatření je zvažována úprava sprchových pater a montáž třetího odlučovače kapek do absorberů.

Grafy č. 16., 17., 18. a 19. jednoznačně dokazují vysokou účinnost mokré metody odsíření pro velké stacionární zdroje. Správnost naměřených hodnot zajišťuje pravidelná týdenní kalibrace referenčním plynem a roční kontrola autorizovaným přístrojem, viz kapitola 4.3.4.3.

Tato technologie je naprosto dostačující i pro nadcházející přísnější emisní limity, které požadují maximální emisní hodnotu SO_2 $130 \text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$. V současnosti je dosažení nižších koncentrací oxidů síry ve spalínách u mokré vápencové vypírky pouze ekonomický problém, nikoliv technologický. Zvýšení účinnosti lze dosáhnout vyšší hodnotou pH v absorberu dávkováním sádrovcové suspenze, jak je vidět na grafu č. 2.

V kapitole 4.3.6. v tabulce č. 33. a 39 jsou zaznamenány hmotnostní bilance emisí v 7EC za roky 2016 a 2017. Pokud uvedené hodnoty dosadíme do vzorce (1) pro výpočet množství vypouštěné látky dostaneme zpětně odlišné hodnoty emisních faktorů E_f , než je uvedeno v [3] v tabulce č. 1. Pro oxidy síry, při nejnižším garantovaném obsahu síry v palivu 0,7 %, je dopočtený emisní faktor E_f pro spaliny za odsířením v rozmezí 1,0 až 1,3 oproti hodnotě 19.

Pro oxidy dusíku, kde není zohledněn procentuální obsah dusíku v palivu, je hodnota E_f v rozmezí 1,3 až 1,4 oproti tabulkové hodnotě 6.

Pro TZL je díky zavedeným technologiím elektrostatických odlučovačů a mokré vápencové vypírce dosaženo hodnoty E_f pod jednu setinu.

Z naměřených a dopočtených hodnot je zřejmé, že emisní faktory uvedené v kapitole 2.1 v tabulce č. 1 uvedené ve Věstníku MŽP, Ročník XIII, SRPEN 2013, ČÁSTKA 8, s. 75-78, při současných technických možnostech, nejsou určeny pro velké spalovací zdroje s kontinuálním měřením emisí. Tyto hodnoty jsou, jak vyplývá z měření uvedených v této práci, významně vyšší.

Modelace emisních příspěvků softwarem SYMOS'97, verze 2013, v kapitole 4.4 je zobrazena na mapě oblasti česko – polského pohraničí zobrazené v Gauss-Krüger S-42 souřadném systému. Použité vstupní meteorologické údaje jsou převzaty z rozptylových studií pro vydání integrovaného povolení jednotlivých stacionárních zdrojů znečištění v roce 2015 a 2016.

Protože při vysokoteplotním spalování v granulačních ohništích s práškovými hořáky jsou těžké kovy několikanásobně déle v kontaktu s úletovým popílkem než s ložovým a dochází následně k absorpci těchto kovů na TZL, jak je popsáno v kapitole 2.1.1, je modelace částic PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ velmi důležitou součástí mé práce. Při porovnání modelace PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ z jednotlivých elektráren, viz tabulky 40., 41., 42. a 43. je patrná větší míra znečištění od 7EC. Ta je evidentně způsobena více jak dvojnásobným výkonem Chvaletické elektrárny a tím i větším hmotnostním množstvím produkovaných emisí. Naopak tento vliv snižuje větší vzdálenost chvaletické elektrárny od referenčních bodů, přibližně o 30 km. Vliv terénu

v porovnání obou zdrojů nemá významný dopad, obě elektrárny stojí v polabské nížině, s podobnou nadmořskou výškou a efektivní výškou výduchu – komína. Mezi nimi nejsou žádné výrazné terénní změny ovlivňující znatelně výpočet koeficientu ϑ ve vzorci (37). K tomuto vlivu dochází až na úpatí Orlických hor.

Modelace rtuti v tabulkách 44. a 45. naopak vykazuje větší imisní příspěvky od elektrárny Opatovice. Tento rozdíl je dán především množstvím vypouštěné rtuti ve spalínách, způsobený jiným druhem paliva, a menší vzdáleností od referenčních bodů v česko-polském pohraničí.

Protože v hnědouhelné energetice doposud nejsou používány technologie pro záchyt těžkých kovů v elementární podobě, imisní příspěvky Hg, Cd, As a Pb odpovídají složení paliv používaných ve spalovacím procesu jednotlivých elektráren, jak je i vidět v tabulkách 46. a 47.

Naměřené výsledky potvrzují snižující se tendenci znečištění ovzduší velkými stacionárními energetickými zdroji. Soustředění výroby elektrické energie a tepla do velkých zdrojů přináší menší negativní vliv na životní prostředí než v případě provozu středních a malých lokálních zdrojů. Velké zdroje mají větší možnosti investování do nových technologií pro odstraňování znečišťujících látek a v současnosti v nich probíhají investice do nových opatření ke snížení úletu polutantů požadovaných od roku 2021.

V oblasti česko-polského pohraničí jsou na české straně pouze dva významní přispěvatelé k imisím, elektrárna Opatovice (EOP) a elektrárna Chvaletice (7EC). Jak již bylo předesláno v úvodu této práce, od roku 2021 mají platit v rámci EU nové přísnější limity pro emise z uhelných elektráren. Záměrem této práce bylo přispět k lepšímu objasnění fyzikálních principů a matematického zpracování této problematiky.

Bylo třeba lépe prozkoumat a objasnit problematiku fyzikálních principů fungování elektrostatických odlučovačů a tkaninových filtrů, které jsou schopny obstát při velmi přísných omezeních regulujících úniky pevných emisí z uhelných elektráren do atmosféry, možnosti a omezení kontinuálních měření emisí a matematického modelování distribuce těžkých kovů uvolňovaných při spalování černého a hnědého uhlí.

V této diplomové práci nejsou, na přání obou navrhovatelů tématu tj. elektráren Chvaletice a Opatovice, uvedena některá upřesňující data k vybraným výpočtům.

Vzhledem k tomu, že pro dodržení výše zmíněných limitů jsou nutné nemalé investice do technologií snižování emisí, měla by mít tato předkládaná práce v blízké budoucnosti i ekonomický efekt.

6 Použitá literatura

- [1] ČERNÝ, V. a kol.: *Parní kotle a spalovací zařízení*. Praha: SNTL, 1975. Řada strojírenské literatury
- [2] ČESKO: *Vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 21. listopadu 2012 o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. In: Sběrka zákonů č. 415. 2012, částka 151, s. 5226-5332, [cit. 2018-05-23]. Dostupné na:
<https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=AE682A6B5E42E986C1257BA60025D8B5&action=openDocument>
- [3] ČESKO: MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Sdělení - Ministerstva životního prostředí, odboru ochrany ovzduší, jímž se stanovují emisní faktory podle § 12 odst. 1 písm. b) vyhlášky č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. In: Věstník MŽP. Ročník XIII, SRPEN 2013, ČÁSTKA 8, s. 75-78. Dostupné na:
<https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/d4bf2b39b58e4dd3c1257be800498ca7?OpenDocument>
- [4] RITZ M., BARTOŇOVÁ L., KLIKA, Z.: *Emise těžkých kovů a polyaromatických uhlovodíků při spalování uhlí v průmyslových a malých topeništích*. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada hornicko-geologická, XLIX (2003), 1, s. 69-82. ISSN 0474-8476
- [5] ČESKO. MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Příloha č. 2 - Metodika výpočtu podílu velikostních frakcí částic PM10 a PM2,5 v emisích tuhých znečišťujících látek a výpočtu podílu emisí NO2 v NOx*. In: Věstník MŽP. Ročník XIII, Srpen 2013, Částka 8, s. 67-69. Dostupné na:
<https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/d4bf2b39b58e4dd3c1257be800498ca7?OpenDocument>
- [6] *Emise základních znečišťujících látek do ovzduší v České republice*. ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD [online], Dostupné na:
<https://www.czso.cz/csu/czso/cr od roku 1989 emise rezzo 1>
- [7] IBLER, Z a kol.; *Technický průvodce energetika*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1. [citováno 2018-06-13]
- [8] STACH M., KLIKA Z., BARTOŇOVÁ L.: *Distribuce a zachytávání rtuti při spalování pevných paliv*. Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada hornicko-geologická, LI (2005), 2, s. 27-42. ISSN 0474-8476. Dostupné na:
<http://gse.vsb.cz/2005/LI-2005-2-27-42.pdf>

- [9] CLARKE, L. B.: In Swaine, D. J., GOODARZI, F.: *Environmental aspect of trace elements in coal*. London, Kluwer Academic Publishers, 1995, s. 127-143. Dostupné na: https://scholar.google.cz/scholar?q=Environmental+aspect+of+trace+elements+in+coal&hl=cs&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart
- [10] KLIKA, Z., WEISS, Z., ROUBÍČEK, V.: *Calculation of Element Distribution between Inorganic and Organic Parts of Coal*. Fuel, 76, (14/15), 1997, s. 1537-1544. Dostupné na: https://scholar.google.cz/scholar?hl=cs&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Calculation+of+Element+Distribution+between+Inorganic+and+Organic+Parts+of+Coal.&btnG
- [11] KLIKA, Z., KOLOMAZNÍK, I.: *New concept of the trace element affinity in coal*. Fuel, 79, (6), 2000, s. 759-670. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236199001878>
- [12] HOWER, J. C., TRIMBLE, A. S., EBLE, C. F., PALMER, C. A., KOLKER, A.: *Characterization of fly ash from low-sulfur and high-sulfur coal sources : Partitioning of carbon and trace elements with particle size*. Energy Sources, 21, (6), 1999, s. 511-525. Dostupné na: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70020925>
- [13] CARPI, A.: *Mercury from combustion sources : A review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere*. Water, Air, and Soil Pollution, 98, (3-4), 1997, s. 241-254. Dostupné na: https://scholar.google.cz/scholar?hl=cs&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=A+review+of+the+chemical+species+emitted+and+their+transport+in+the+atmosphere.+&btnG
- [14] KRISHNAN, S. V., GULLETT, B. K., JOSEWITZ, W.: *Mercury control in municipal waste combustors and coal-fired utilities*. Environmental Progress, 16, (1), 1997, s. 47-53. Dostupné na: https://scholar.google.cz/scholar?hl=cs&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Mercury+control+in+municipal+waste+combustors+and+coal-fired+utilities.+&btnG
- [15] Kol.: *Flue gas desulfurization* [online]. 2012, [cit. 2018-05-23]. Dostupné na: http://en.citizendium.org/wiki/Flue_gas_desulfurization
- [16] VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P.: *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-517-X. [citováno 2018-05-22]

- [17] Kol.: *Integrovaná prevence a omezování znečištění, referenční dokumenty*. 2017. [cit. 2018-05-15]. Dostupné na: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/lcp_31-3-2010_complete.pdf
- [18] HOLM H. J.: *Implementation of SCR DeNO_x technology on coal-fired boilers*. Haldor Topsoe A/S. Dostupné na: https://www.topsoe.com/sites/default/files/implementation_of_scr_denox_technology_on_coal_fired_boilers_2008.ashx.pdf
- [19] STAUDT, J.E., et al: *Optimizing Selective Non-Catalytic Reduction Systems for Cost-Effective Operation on Coal-Fired Electric Utility Boilers*. [cit. 2018-05-15]. Dostupné na : <http://www.andovertechnology.com>
- [20] HEMERKA, J.: *Odlučování tuhých částic*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02270-6. [citováno 2018-04-02]
- [21] NOVÁK, J.: *7EC_2_004r00 Místní provozní předpis – Elektrostatické odlučovače popílků strojní*. Sev.en EC, 2017, (interní firemní materiály).
- [22] SICK, *GM 31 TCU Insitu Gas Analyzer: Operating Instructions*. Reute Germany, 2005.
- [23] ČESKO: MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Příloha č. 1 - Metodická příručka modelu SYMOS'97 – aktualizace 2013*. In: Věstník MŽP. Ročník XIII, Srpen 2013, Částka 8, s. 18-66.[cit. 2018-06-28]. Dostupné na: <https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/e75c7074f3a42826c1256b0100778c9a/d4bf2b39b58e4dd3c1257be800498ca7?OpenDocument>
- [24] VACH, M.: *Ochrana ovzduší*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2005. ISBN 8021313889. [citováno 2018-07-03].
- [25] RAJFUR M., KŁOS A., GAWLIK D., HYŠPLEROVÁ L., WACŁAWEK M.: *Accumulation of heavy metals in the mosses *Pleurozium schreberi* exposed near the track racing in Kamien Slaski*. Proc ECOpole. 2010;4(2):477-482. Dostupné na: <http://tchie.uni.opole.pl/SECE/index.php/proceedings-of-ecopole/articles-in-peco/peco-2010>
- [26] KŁOS A., RAJFUR M., WACŁAWEK M., ŠRÁMEK I., TRNKOVÁ L., RADVAN R., HYŠPLEROVÁ L.: *Wykorzystanie porostów, mchów i gleb do oceny zanieczyszczenia Euroregionów Pradęd i Glacensis*. Opole: Monograph POWT RCz-RP, TCHiE; 2010: 75-98.
- [27] DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA A., ZIEMBIK Z., WACŁAWEK M., HYŠPLEROVÁ L.: *Transfer of Cesium-137 from forest soil to moss*. Ecological Chemistry and Engineering S. 2011;18(4):509-516. Dostupné na: <http://tchie.uni.opole.pl/SECE/index.php/ecological-chemistry-and-engineering-s/articles-in-ece-s/ece-s-2011>, <https://www.degruyter.com/view/j/eces>

- [28] ZIEMBIK Z., DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA A., KRÍŽ J., HYŠPLEROVÁ L., VYBÍRAL B., WACŁAWEK M.: *Investigation of relationships between alkaline metals content in mushroom Xerocomus badius*. Proc ECOpole. 2012;6(3):520-524. Dostupné na: <http://tchie.uni.opole.pl/SECE/index.php/ecological-chemistry-and-engineering-s/articles-in-ece-s/ece-s-2012>, <https://www.degruyter.com/view/j/eces>
- [29] KRÍŽ, J., LOSKOT J., ŠTĚPÁNEK, V., HYŠPLEROVÁ, L., JEZBERA D., TRNKOVÁ, L., DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA, A, ZIEMBIK Z., RAJFUR, M., KLOS, A., WACŁAWEK, M.: *Modeling of mercury emissions from large solid fuel combustion and biomonitoring in CZ-PL border region*. Ecological Chemistry and Engineering S. 2016; 23 (4), 593-604. DOI: 10.1515/eces-2016-0042. Dostupné na: <http://tchie.uni.opole.pl/SECE/index.php/ecological-chemistry-and-engineering-s/articles-in-ece-s/ece-s-2016>, <https://www.degruyter.com/view/j/eces>
- [30] DOLEČEK, I.: *7EC_3_001r03 Místní provozní předpis Odsíření kouřových plynů*. Sev.en EC, 2017, (interní firemní materiály).
- [31] VÝBORNÝ, M.: *7EC_6_014r03 Místní provozní předpis Elektrostatický odlučovač – část elektro*. Sev.en EC, 2017, (interní firemní materiály).
- [32] ZVVZ-Enven Engineering, a.s.: *Návod k používání – Elektrický odlučovač*, 2015, (interní firemní materiály).
- [33] HAMON RESEARCH-COTTREL GmbH: *Reduction of dust and NOx emissions in opatovice power station for boilers K2, K3, K5 and K6*. Basic desing documentation, 2014 (interní firemní materiály).
- [34] N-ERGIA Sp. z o. o.: *Performance of hvt measurements of the boiler of the power unit No 2 in the chvaletice power station in the Czech Republi* . 2015. (interní firemní materiály).
- [35] HEIDE B.: *Advanced SNCR Technology for Power Plants*, [online]. Dostupné na: <https://www.ms-umwelt.de/en/scope-of-delivery-and-services/denox/>
- [36] Královopolská RIA a.s.: *Technologie SNCR - Předběžný provozní předpis*. 2016. (interní firemní materiály).
- [37] *Absorption spectra of water and ammoni* [online obrázek]. In: SIEMENS, Operating principe. Dostupné na: http://siemens71.ru/new/?fn=10028650_G
- [38] SICK, *GM700 Probe version: Operating instructions*. Reute Germany. 2018. Dostupné na: <https://www.sick.com/us/en/gas-analyzers/in-situ-gas-analyzers/gm700/c/g57451>
- [39] DURAG GmbH: *D-R 290, D-R 820 Service manual*. 2012.(interní firemní materiály).

7 Související publikační činnost autora

[1] ŠTĚPÁNEK, V., LOSKOT J., SMOLÍK M., HYŠPLEROVÁ, L., KŘÍŽ, J.: Reduction of particulate matter and mercury emissions from coal power plants, comparative emission modeling in CZ-PL reference points. 26th Annual European Conference ECOPole 17 [Poster session]. Dostupné na:

http://ecopole.uni.opole.pl/eco1/arch/eco17/streszcz17_en.php?lp=58

[2] KŘÍŽ, J., LOSKOT J., ŠTĚPÁNEK, V., HYŠPLEROVÁ, L., JEZBERA D., TRNKOVÁ, L., DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA, A, ZIEMBIK Z., RAJFUR, M., KLOS, A., WACŁAWEK, M.: Modeling of mercury emissions from large solid fuel combustion and biomonitoring in CZ-PL border region. Ecological Chemistry and Engineering S. 2016; 23 (4), 593-604. DOI: 10.1515/eces-2016-0042.

<https://www.degruyter.com/view/j/eces>

[3] LOSKOT J., SMOLÍK M., ŠTĚPÁNEK, V., HYŠPLEROVÁ, L., TRNKOVÁ, L., KŘÍŽ, J.: Modeling and biomonitoring of mercury emissions from large solid fuel combustion in the czech-polish border region. 25th Annual European Conference ECOPole 16 [Poster session]. Dostupné na:

http://ecopole.uni.opole.pl/eco1/arch/eco16/streszcz16_en.php?lp=91

[4] KŘÍŽ J., RADOCHA K., HYŠPLEROVÁ L., SMOLÍK M., ŠTĚPÁNEK V., EMINGER S., VARGOVÁ A.: Technologické a environmentální modely ve výuce katedry fyziky PŘF UHK Media4u Magazine, 2/2016, s. 59-65. Dostupné na:

https://www.google.cz/search?q=Media4u+Magazine%2C+2%2F2016&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab&gfe_rd=cr&dcr=0&ei=WWaqWpi0JafL8gfDqr6ACg

[5] ŠTĚPÁNEK V., EMINGER S., STOKLAS D., KLÍMOVÁ S., HYŠPLEROVÁ L., KŘÍŽ J.: Emisja toksycznych metali z dużych elektrowni węglowych na czesko-polskim pograniczu. Modele matematyczne. In: Propagowanie badań jakości środowiska na transgranicznym obszarze polsko-czeskim. BASNET, Opole, 2014, s.97-105. ISBN 978-83-916958-5-2

[6] KŘÍŽ, J., HYŠPLEROVÁ, L., ŠTĚPÁNEK, V., EMINGER, S., TRNKOVÁ, L., DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA, A, ZIEMBIK Z., RAJFUR, M., KLOS, A., WACŁAWEK, M.: Dispersion models of toxic metals from large emission sources on the czech-polish border region 23th Annual European Conference ECOPole 14 [Poster session]. Dostupné na: http://ecopole.uni.opole.pl/scr/streszcz_en.php?lp=121

[7] JEZBERA D., STUDNIČKA F., ŠTĚPÁNEK V., KŘÍŽ J.: Analiza danych systemów ciągłego monitorowania wskaźników środowiskowych i biomedycznych. In: Propagowanie badań jakości środowiska na transgranicznym obszarze polsko-czeskim. BASNET, Opole, 2014, s. 117-125. ISBN 978-83-916958-5-2.

Aktivní účast na mezinárodních konferencích:

1. 23th Annual European Conference ECOPole'14, [Poster session], 15. – 18. 10. 2014 Jarnołtówek, Polsko
2. 25th Annual European Conference ECOPole'16, [Poster session], 5. – 8. 10. 2016 Zakopane, Polsko
3. 26th Annual European Conference ECOPole'17, [Poster session], 4. – 7. 10. 2017 Polanica Zdrój, Polsko
4. International Ecological Conference MED'14, [Oral communication], Bělá pod Pradědem, 19. – 21. 6. 2014. Measurement and modeling of emissions from coal-fired power plants on CZ-PL cross-border region.

Přílohy

I. Seznam použitých zkratk a symbolů

7EC	označení elektrárny Chvaletice
AMS	automatická měřící stanice
EO	elektrostatický odlučovač
EOP	označení elektrárny Opatovice
LAN	lokální počítačová síť
MŽP ČR	Ministerstvo životního prostředí ČR
NO _x	souhrnné označení pro oxidy dusíku
NRM	normovaná referenční hodnota
ODS	označení technologie odsíření
PLC	programovatelný logický automat
PM ₁₀	částice do velikosti 10 μm
PM _{2,5}	částice do velikosti 2,5 μm
SCR	označení technologie selektivní katalytické redukce
SNCR	označení technologie selektivní nekatalytické redukce
SOP	suchý odběr popela
SQL	standardizovaný strukturovaný dotazovací jazyk pro práci s daty
TZL	tuhé znečišťující látky
US	usazovací elektroda
VNE	vysokonapěťová elektroda
VVN	velmi vysoké napětí
<i>a</i>	průměr částice [m]
<i>a_y, b_y</i>	koeficienty pro výpočet horizontálního rozptylového parametru σ_y [-]
<i>a_z, b_z</i>	koeficienty pro výpočet vertikálního rozptylového parametru σ_z [-]
\bar{a}	svislý posun kalibrační funkce [-]
<i>A, B</i>	konstanty závislé na tepelné vydatnosti zdroje [-]

A_p	obsah popela v původním vzorku paliva [%]
\bar{b}	směrnice kalibrační funkce [-]
B	pohyblivost částice [$s \cdot kg^{-1}$]
c	krátkodobá imisní koncentrace [$\mu g \cdot m^{-3}$]
c_s	měrné teplo exhalací [$k \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]
\bar{c}	průměrná roční imisní koncentrace [$\mu g \cdot m^{-3}$]
C_D	hodnota součinitele odporu závislého na Reynoldsovu kritériu obtékání částice [-]
d	vnitřní průměr výduchu nebo komína [m]
d_N	střední aritmetický průměr vlákna [m]
D_i	rozdíl mezi naměřenými hodnotami v jednom měření [-]
$D_{prům}$	průměrná hodnota D_i [-]
D_B	součinitel tepelné (Brownovské) difúze [$m^2 \cdot s^{-1}$]
D_V	průměr výduchu nebo komína [m]
E	hodnota emisního limitu [$mg \cdot m^{-3}$]
E_f	emisní faktor [$kg \cdot t^{-1}$]
E_z	množství vypouštěné znečišťující látky [kg]
f_φ	relativní četnost větru ve směru φ ve větrné růžici [-]
$F(z)$	kumulativní četnost výskytu horní inverze mezi stanovenou výškou a výškou hladiny 85kPa [-]
$F'(z)$	upravená kumulativní četnost podle třídy stability [-]
g	hodnota gravitačního zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
h	efektivní výška zdroje bez započtení vlivu terénu [m]
h_1	efektivní výška zdroje [m]
I	naměřená intenzita [$W \cdot m^{-2}$]
I_0	počáteční intenzita [$W \cdot m^{-2}$]
k	Boltzmannova konstanta $1,3806 \cdot 10^{-23}$ [$J \cdot K^{-1}$]
k	extinkční koeficient [$m^2 \cdot g^{-1}$]
k_v	zkušební hodnota pro zjištění variability [-]

K_m	koeficient pro postupný vznos vlečky u zdroje [-]
K_s	korekce na teplotní stabilitu atmosféry [-]
K_h	koeficient zeslabení od nízkých zdrojů do vyšších nadmořských výšek [-]
l	výška referenčního bodu nad terénem [m]
L	délka měřicí trasy [m]
M	množství jednotek [t]
M	množství znečišťující látky odcházející komínem nebo výduchem [g.s-1]
N	počet párových měření [-]
p	procentuální podíl [-]
p	exponent z mocninového profilu větru [-]
p	tlak vzduchu [Pa]
Pe	Pecletovo kritérium [-]
Q	tepelná vydatnost [MW]
Q_r	výhřevnost paliva [MJ·kg ⁻¹]
Re	hodnota Reynoldsova kritéria obtékání částice [-]
S_h	množství spáleného paliva za hodinu [kg·hod ⁻¹ ; m ³ ·hod ⁻¹]
S_m	množství síry [g·MJ ⁻¹]
S_p	obsah síry v původním vzorku paliva [%]
S_r	množství spáleného paliva za rok [kg·r ⁻¹ ; m ³ ·r ⁻¹]
S_D	směrodatná odchylka rozdílů D_i výsledků souběžného měření [-]
t_0	teplota okolního vzduchu [°C], předpokládaná teplota 0°C
$t_{0,95}$	hodnota Studentova rozdělení [-]
t_s	teplota exhalací ve výduchu [°C]
T	absolutní teplota [K]
u_h	rychlost větru u vrchu výduchu nebo komína [m·s ⁻¹]
u_{10}	rychlost větru ve výšce 10m [m·s ⁻¹]
v_0	rychlost vzduchu ve vláknité vrstvě [m·s ⁻¹]
v_p	pádová rychlost částice [m·s ⁻¹]

v_r	vzájemná relativní rychlost částice a plynu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_u	usazovací rychlost částice [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
V	objemový tok spalin za skutečných podmínek [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
V_v	množství vzduchu skutečně přivedeného do spalovací komory [m^3]
$V_{v\ min}$	teoretické množství vzduchu potřebné k dokonalému spálení [m^3]
V_S	objemový tok spalin z výduchu přepočtený na normální podmínky [$\text{Nm}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
w_0	výstupní rychlost spalin [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
x	vzdálenost referenčního bodu a zdroje [m]
$x_{prům}$	průměrná hodnota signálu [mA]
x_r, y_r	souřadnice referenčního bodu v základním souřadném systému [m]
x_z, y_z	souřadnice zdroje v základním souřadném systému [m]
x_L	vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru větru [m]
$y_{prům}$	průměrná hodnota získaná z gravimetrického měření [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
y_L	vzdálenost referenčního bodu od zdroje ve směru kolmém na směr větru [m]
\hat{y}	nejlepší odhad skutečné hodnoty [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
z	výškový rozdíl mezi referenčním bodem a terénem v místě komína [m]
z_m	maximální hodnota nadmořské výšky terénu nad úrovní komína mezi zdrojem a referenčním bodem [m]
z_r	nadmořská výška terénu zdroje [m]
z_z	nadmořská výška terénu referenčního zdroje [m]
z'	korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu pro přímý rozptyl [m]
z''	korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujícím odraz v dolním odhadu [m]
z'''	korigovaná vertikální souřadnice referenčního bodu v členu popisujících odraz v horním odhadu [m]
Z	rozdíl mezi nulovým čtením měřicího přístroje a nulou [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]

α	přebytek vzduchu při spalování [-]
α	relativní maximální využití zdroje [-]
β	hodnota závislá na teplotě spalin [-]
Δh	převýšení kouřové vlečky nad ústím [m]
ε	vliv terénu dle atmosférických podmínek [-]
η	dynamická viskozita [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$]
ϑ	koeficient pro zvlněný terén [-]
λ	úhel mezi směrem větru a spojnicí zdroj-referenční bod [°]
ρ	hustota odlučovaného plynu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
ρ_2	hustota částice [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ_o	nejistota odvozená z legislativních požadavků pro kalibraci měření [-]
σ_y	příčný horizontální rozptylový parametr [-]
σ_z	příčný vertikální rozptylový parametr [-]
φ	směr větru ve větrné růžici [°]
φ_h	směru větru v efektivní výšce nad 10 m [°]
φ_{10}	směr větru ve výšce 10 m [°]

II. Seznam obrázků a grafů

Seznam obrázků

Obr. 1. Schéma fluidního kotle se suchým odsiřováním [obr. vlastní]	18
Obr. 2. Schéma polosuchého odsíření [obr. vlastní].....	19
Obr. 3. Gaussovský model rozptylu [24].....	29
Obr. 4. Schéma dolního odhadu [24]	30
Obr. 5. Schéma horního odrazu [24].....	30
Obr. 6. Schéma pro výpočet θ [24]	31
Obr. 7. Mapa sledovaných referenčních bodů [30].....	36
Obr. 8. Dosah modelace Symos'97 pro elektrárny v pohraničí [30]	36
Obr. 9. Schéma odsíření v 7EC [obr. vlastní]	38
Obr. 10. Odlučovač kapek absorberu[foto vlastní]	40
Obr. 11. Pohled ze střechy kotelny na chladicí věže, v průhledu jsou budovy absorberu odsiřovacích linek [foto vlastní]	40
Obr. 12. Elektrostatické odlučovače v 7EC [foto vlastní]	42
Obr. 13. Znázornění elektrod [32].....	42
Obr. 14. Průřez elektrostatickými odlučovači [32].....	43
Obr. 15. Oklepy elektrod [foto vlastní]	44
Obr. 16. Schéma tkaninových filtrů [obr. vlastní]	46
Obr. 17. Konstrukce rukávu [28].....	46
Obr. 18. Měření teplotních polí na kotli č. 3 prováděné firmou HTV-NERGIA v roce 2015 [34].....	47
Obr. 19. Vizualizace SNCR vstříků, upraveno dle [34]	48
Obr. 20. Vstřikovací kopí SNCR [31]	49
Obr. 21. Vstříky na kótě 40,0m [foto vlastní].....	50
Obr. 22. Odběr PZL za ODS [foto vlastní].....	51
Obr. 23. Měřicí stanice ABB u ODS [foto vlastní].....	52
Obr. 24. Schéma ABB AO 2000 [schéma vlastní]	53
Obr. 25. Schéma přístroje Durag 290 [39]	56
Obr. 26. Schéma přístroje Durag 820, upraveno dle [39]	57
Obr. 27. Blokové schéma měření emisí v 7EC.....	84

Obr. 28. Úvodní obrazovka systému měření emisí.....	88
Obr. 29. Modelace PM ₁₀ z elektrárny Chvaletice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].....	94
Obr. 30. Modelace PM ₁₀ z elektrárny Opatovice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].....	95
Obr. 31. Modelace PM _{2,5} z elektrárny Chvaletice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].....	96
Obr. 32. Modelace imisí PM _{2,5} z elektrárny Opatovice [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].....	97
Obr. 33. Modelace Hg z elektrárny Chvaletice [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$].....	98
Obr. 34. Modelace Hg z elektrárny Opatovice [$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$].....	99

Seznam grafů

Graf 1. Extinkční křivky SO ₂ a NO [22].....	26
Graf 2. Závislost účinnosti odsíření, upraveno podle [30].....	39
Graf 3. Absorpční křivka tzv. čpavkového skluzu, upraveno dle [37].....	49
Graf 4. Grafické zpracování kontinuálního měření NO _x bez SNCR.....	62
Graf 5. Statistické zpracování kontinuálního měření NO _x bez SNCR.....	62
Graf 6. Grafické zpracování kontinuálního měření NO _x se SNCR.....	64
Graf 7. Statistické zpracování kontinuálního měření NO _x se SNCR.....	64
Graf 8. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace NO _x	66
Graf 9. Grafické zpracování kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry.....	69
Graf 10. Statistické zpracování kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry.....	69
Graf 11. Grafické zpracování kontinuálního měření TZL za EO.....	71
Graf 12. Statistické zpracování kontinuálního měření TZL za EO.....	71
Graf 13. Grafické zpracování kontinuálního měření emisí TZL za ODS.....	73
Graf 14. Statistické zpracování kontinuálního měření emisí TZL ODS.....	73
Graf 15. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace TZL.....	76
Graf 16. Grafické zpracování kontinuálního měření SO ₂ za EO.....	78
Graf 17. Statistické zpracování kontinuálního měření SO ₂ za EO.....	78
Graf 18. Grafické zpracování kontinuálního měření emisí SO ₂ za ODS.....	80
Graf 19. Statistické zpracování kontinuálního měření emisí SO ₂ za ODS.....	80
Graf 20. Rozptyl nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace SO ₂	82

III. Seznam tabulek

Tab. 1. Hodnoty emisních faktorů [3]	12
Tab. 2: Podíl PM ₁₀ a PM _{2,5} v emisích TZL za odlučovačem [5]	13
Tab. 3. Seznam primárních opatření pro snížení NOX vysokoteplotní spalování uhlí [tab. vlastní]	20
Tab. 4. Průměrná doba setrvání vybraných látek v ovzduší [23]	33
Tab. 5. Parametry absorberu odsíření [30]	41
Tab. 6. Parametry usměrňovačů EO v 7EC [32]	44
Tab. 7. Garantované parametry EO v 7EC [31]	45
Tab. 8. Parametry tkaninových filtrů v elektrárně Opatovice [28]	47
Tab. 9. Specifikace technologie SNCR v 7EC [36]	50
Tab. 10. Rozbor paliva Mix z dolů Vršany a ČSA	59
Tab. 11. Chemický rozbor popela (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)	60
Tab. 12. Obsah stopových prvků v popelu (palivo Mix z dolů Vršany a ČSA)	60
Tab. 13. Výřez hodnot kontinuálního měření NO _x bez SNCR	61
Tab. 14. Výřez hodnot kontinuálního měření NO _x se SNCR	63
Tab. 15. Naměřené hodnoty koncentrací NO _x měřící stanicí a vozem HORIBA	65
Tab. 16. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace NO _x ..	67
Tab. 17. Výřez hodnot kontinuálního měření TZL za tkaninovými filtry	68
Tab. 18. Výřez hodnot kontinuálního měření emisí TZL za EO	70
Tab. 19. Výřez hodnot kontinuálního měření emisí TZL za ODS	72
Tab. 20. Naměřené hodnoty proudového výstupu a gravimetrie TZL	74
Tab. 21. Experimentální výsledky pro výpočet testu variability	75
Tab. 22. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace měření koncentrace TZL...	76
Tab. 23. Výřez hodnot kontinuálního měření SO ₂ za EO	77
Tab. 24. Výřez hodnot kontinuálního měření SO ₂ za ODS	79

Tab. 25. Naměřené hodnoty koncentrací SO ₂ měřící stanicí a vozem HORIBA	81
Tab. 26. Hodnoty rozptylu nulového bodu a rozpětí kalibrace koncentrace SO ₂	83
Tab. 28. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 1	89
Tab. 29. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 2	89
Tab. 30. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 3	90
Tab. 31. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 4	90
Tab. 32. Měsíční hmotnostní bilance paliva a odloučeného popílků v EO	90
Tab. 33. Hmotnostní bilance emisí za odsířením	91
Tab. 34. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 1	91
Tab. 35. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 2	91
Tab. 36. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 3	92
Tab. 37. Měsíční hmotnostní bilance polutantů bloku č. 4	92
Tab. 38. Měsíční hmotnostní bilance paliva a odloučeného popílků v EO	93
Tab. 39. Hmotnostní bilance emisí za odsířením	93
Tab. 40. Imisní příspěvky PM ₁₀ elektrárny Chvaletice v referenčních bodech	94
Tab. 41. Imisní příspěvky PM ₁₀ elektrárny Opatovice v referenčních bodech	95
Tab. 42. Imisní příspěvky PM _{2,5} elektrárny Chvaletice v referenčních bodech	96
Tab. 43. Imisní příspěvky PM _{2,5} elektrárny Opatovice v referenčních bodech	97
Tab. 44. Imisní příspěvky Hg elektrárny Chvaletice v referenčních bodech	98
Tab. 45. Imisní příspěvky Hg elektrárny Opatovice v referenčních bodech	99
Tab. 46. Imisní příspěvky těžkých kovů elektrárny Chvaletice v referenčních bodech	100
Tab. 47. Imisní příspěvky těžkých kovů elektrárny Opatovice v referenčních bodech	100