

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Účinnost odsíření provozu fluidního kotle FK12 v ETI 1**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít SLUKA**  
Osobní číslo: **E13N0029K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Účinnost odsíření provozu fluidního kotle FK12 v ETI 1**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište systém provozu ETI 1 včetně parametrů zařízení a zaměřte se na provoz kotle FK12, zejména v souvislosti s provedenými úpravami zásobování vápencem.
2. Analyzujte dopad úprav na provoz kotle a účinnost odsíření při různých provozních režimech.
3. Vyhodnoťte získané výsledky, zpracujte ekonomickou bilanci a doporučení pro provozovatele zařízení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předmětem diplomové práce je účinnost odsíření FK12 hrubozrnným vápencem. Dále systém dopravy a dávkování hrubozrnného vápence do kotle. Práce také zahrnuje popis a účinnost odsíření jemnozrnným vápencem. Hodnoty, se kterými se pracovalo, byly získány během zkoušek určených pro tento účel. Tyto dva typy odsíření jsou následně porovnány jak v účinnosti odsíření, tak i z hlediska ekonomie provozu. Dále je v práci zahrnut základní popis ETI 1 se zaměřením na fluidní kotel FK12, především pak na vápencové hospodářství.

## **Klíčová slova**

Hrubozrnný vápenec, kusový vápenec, jemnozrnný vápenec, odsíření, fluidní kotel, fluidní spalování, fluidizace, úletový popel, ložový popel, produkt odsíření, dávkování vápence, nezreagovaný vápenec, nezkalcinovaný vápenec

**Abstract**

The subject of my thesis is efficiency of desulphurization FK12 with help of coarse-grained limestone. The thesis deals also with system of transport and dosing of coarse-grained limestone into boilers. The thesis includes also description and efficiency of desulphurization with help of fine-grained limestone. The thesis deals with values which were discovered during tests for this purpose. These two types of desulphurization were compared in efficiency of desulphurization and in terms of operation economy. Basic description of ETI 1 focusing on fluid boiler FK12 and limestone economy are also discussed in the thesis.

**Key words**

Coarse-grained limestone, particulate limestone, fine-grained limestone, desulphurization, fluid boiler, fluid combustion, fluidization, fly-ash, bottom ash, desulphurization product, dosing of limestone, non-reacted limestone, non-calcined limestone

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 29.4.2015

Vít Sluka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Vladimíru Mávrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ELEKTRÁRNA TISOVÁ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ELEKTRÁRNA TISOVÁ A JEJÍ GEOGRAFICKÉ UMÍSTĚNÍ .....	12
1.2 HISTORIE VÝSTAVBY .....	13
1.3 VLASTNÍ VÝSTAVBA .....	13
1.4 SOUČASNÝ STAV A TECHNICKÉ PARAMETRY .....	15
<b>2 ETI 1</b> .....	<b>16</b>
2.1 TURBOGENERÁTORY .....	16
2.2 FLUIDNÍ KOTLE FK11, FK12 .....	16
2.2.1 Základní parametry FK11 .....	17
2.2.2 Základní technické parametry FK12 .....	17
2.2.3 Spalované palivo .....	19
2.2.4 Vápenec .....	20
2.2.5 Popeloviny z FK12 .....	21
<b>3 ZÁKLADNÍ POPIS FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1 FLUIDIZACE .....	22
3.1.1 Princip fluidizace .....	22
<b>4 VÁPENCOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ FK12</b> .....	<b>26</b>
4.1 JEMNOZRNNÝ VÁPENEC .....	26
4.1.1 Stáčení jemnozrnného vápence .....	26
4.1.2 Vnější síla jemnozrnného vápence .....	27
4.1.3 Doprava z QVB10, 20 a 30 .....	27
4.1.4 Vnitřní zásobník jemnozrnného vápence pro FK12 (EMK01) .....	28
4.1.5 Doprava jemnozrnného vápence do kotle .....	28
4.2 HRUBOZRNNÝ (KUSOVÝ) VÁPENEC .....	31
4.2.1 Základní technická charakteristika hospodářství hrubozrnného vápence .....	32
4.2.2 Manipulace hrubozrnného vápence ze složiště do kotle FK12 .....	35
<b>5 ZKOUŠKY ODSÍŘENÍ HRUBOZRNNÝM VÁPENCEM</b> .....	<b>41</b>
5.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE VZTAHUJÍCÍ SE KE ZKOUŠKÁM .....	41
5.1.1 Popis stávajícího stavu při zkouškách .....	41
5.2 PRŮBĚH ZKOUŠKY .....	42
5.2.1 Výstupní hodnoty zkoušky .....	43
5.2.2 Výsledky zkoušek s hrubozrnným vápencem .....	64
<b>6 ZKOUŠKY ODSÍŘENÍ JEMNOZRNNÝM VÁPENCEM</b> .....	<b>68</b>
6.1 PRŮBĚH ZKOUŠKY .....	68
6.1.1 Výsledky zkoušek s jemnozrnným vápencem .....	78
<b>7 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ OBOU ZKOUŠEK</b> .....	<b>79</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>81</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>83</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$A^d$ .....	Popel v sušině (bezvodný stav)
$A^r$ .....	Popel v surovém uhlí (surový stav)
$C^a$ .....	Obsah uhlíku, podíl spalitelných látek (analytický stav)
$C^d$ .....	Obsah uhlíku, podíl spalitelných látek (bezvodný stav)
$C^r$ .....	Obsah uhlíku, podíl spalitelných látek (surový stav)
$C^{daf}$ .....	Obsah uhlíku, podíl spalitelných látek (zdánlivá hořlavina)
$Cl^d$ .....	Obsah chloru (bezvodný stav)
ETI.....	Elektrárna Tisová
$F^d$ .....	Obsah fluoru (bezvodný stav)
FK.....	Fluidní kotel
FP.....	Filtrový popílek
$H^r$ .....	Obsah vodíku (surový stav)
KP.....	Komorový podavač
LJUVO.....	Rotační ohřívák vzduchu
LP.....	Ložový popel
MTN.....	Měřicí transformátor napětí
MTP.....	Měřicí transformátor proudu
$N^r$ .....	Obsah dusíku (surový stav)
$O^r$ .....	Obsah kyslíku (surový stav)
POV.....	Parní ohřívák vzduchu
$Q_i^r$ .....	Výhřevnost
ŘS.....	Řídicí stanoviště

---

SBS.....	Statická budicí souprava
$S^d$ .....	Síra v sušině (bezvodný stav)
$S_{spal}^r$ .....	Hmotnostní podíl spalitelné síry
$S^r$ .....	Síra v surovém uhlí (surový stav)
$V_{daf}$ .....	Prchavá hořlavina
$W^a$ .....	Obsah vody, vlhkost paliva (analytický stav)
$W^r$ .....	Obsah vody, vlhkost paliva (surový stav)

## Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na účinnost odsíření fluidního kotle FK12 v elektrárně Tisová. Technologii odsíření tohoto fluidního kotle lze rozdělit na dva samostatně pracující technologické celky.

Jeden z těchto technologických celků je odsiřování hrubozrnným (kusovým) vápencem dávkovaným do kotle přímo s palivem. Druhý technologický celek pro odsiřování je navržen pro dávkování jemnozrnného vápence, který je do kotle dávkován samostatně.

Za účelem porovnání účinnosti odsíření byly provedeny zkoušky pro oba celky samostatně, z kterých byly následně vyhodnoceny výsledky.

Vzhledem ke složitosti této problematiky je nutno podotknout, že není možné uvažovat všechny faktory ovlivňující výsledky.

V práci jsou uváděny metodické postupy, výsledky dílčích i konečných výpočtů. Není však možné uvádět konkrétní výpočty, neboť jsou výhradním duševním vlastnictvím skupiny ČEZ a tvoří součást obchodního tajemství.

# 1 Elektrárna Tisová



Obr. 1.1 *Elektrárna Tisová (současné foto), převzato z [1]*

## 1.1 Elektrárna Tisová a její geografické umístění

Elektrárna Tisová leží v západní části Sokolovské pánve mezi Krušnými horami a Slavkovským lesem. Je nejzápadněji situovaným energetickým zdrojem ČEZ, a. s., a patří k nejstarším hnědouhelným elektrárnám. Leží v nadmořské výšce 405 m a geograficky je téměř v geometrickém středu lázeňského trojúhelníku, jehož vrcholy tvoří lázeňská města Karlovy Vary, Mariánské Lázně a Františkovy Lázně. Je vybudována na místě původní hornické obce Tisová, která musela svého času ustoupit důlní činnosti. O jejím umístění právě do těchto míst rozhodly dva důležité faktory - řeka Ohře, ze které je zásobována vodou, a blízké zásoby sokolovského hnědého uhlí. [1]

## 1.2 Historie výstavby

Historie elektrárny začíná v lednu roku 1953, kdy bylo rozhodnuto o výstavbě a začala se zpracovávat projektová dokumentace a následně i příprava staveniště. Byly provedeny rozsáhlé úpravy terénu na rozloze téměř 41 ha. Zahrnovaly demolici bývalé obce Tisová, přeložky vodovodu a Tisovského potoka, zvýšení terénu staveniště navážkou nad úroveň stoleté vody, zasypaní slepých ramen řeky Ohře. Stavba vyvolala ovšem ještě další rozsáhlé investice. Vybudování pobřežní silnice Citice - Černý mlýn, regulaci toku Ohře, vybudování jezu Černý mlýn a ochranné hráze proti záplavám, vybudování přehrady Jesenice na řece Odravě pro zajištění potřebného množství užitkové vody a zlepšení průtoku řeky Ohře, zajištění přenosu výkonu elektrárny do energosystému příslušným elektrickým vedením do rozvodny Sokolov - Vítkov, vybudování lávky přes řeku Ohři k železniční zastávce Hlavno pro zaměstnance dojíždějící ze směrů od Chebu a Karlových Varů. [1]

## 1.3 Vlastní výstavba

Vlastní výstavbu elektrárny lze rozdělit do dvou technologických celků ETI 1 a ETI 2.

Výstavba ETI 1 byla zahájena v r. 1954. Bylo instalováno osm kotlů 125 t/h a čtyři turbosoustrojí 50 MW. V prosinci r. 1958 byl přifázován první turbogenerátor 50 MW a v r. 1959 byla instalovaná poslední turbína - protitlaká 12 MW. Celkový instalovaný výkon ETI 1 tak činil 212 MW. Zdrojem páry ETI 1 byly původní vysokotlaké, třítahové kotle s granulačním ohništěm a přirozenou cirkulací. Každý kotel měl čtyři mlecí okruhy s tlukadlovými mlýny, které byly v letech 1965 - 1970 rekonstruovány a vybaveny ventilátorovými mlýny s přímým foukáním uhelného prášku do ohniště. Pro zapalování kotlů se používal lehký a těžký topný olej. Propojení kotlů bylo řešeno sběrníkovým uspořádáním, tzn. měly společnou sběrnou napájecí vody a vyrobená pára byla vedena do společné parní sítě.

Výstavba ETI 2 byla zahájena v r. 1955. Byly instalovány tři bloky 100 MW, které byly uvedeny do provozu v letech 1960 až 1962. Celkový instalovaný výkon ETI 2 činil 300 MW.

Zdrojem páry ETI 2 byly 3 vysokotlaké, třítahové kotle s granulačním ohništěm, přirozenou cirkulací vody a přehříváním páry o výkonu 330 t/h. Kotle měly čtyři mlecí okruhy s tlukadlovými mlýny, které byly v letech 1971 - 1973 nahrazeny ventilátorovými mlýny s přímým foukáním prášku do ohniště. Pro zapalování kotlů se používal rovněž lehký a těžký topný olej. V celkové koncepci se stala Elektrárna Tisová svým výkonem 512 MW ve své době

první československou velkoelektrárnou a byly v ní poprvé instalovány a ověřeny v provozu bloky o výkonu 100 MW. V roce 1964, po ukončení výstavby a stabilizaci provozu, se Elektrárna Tisová podílela na výrobě elektrické energie celé elektrizační soustavy republiky 9,8 %.

V průběhu let 1983 až 1987 proběhly rozsáhlé rekonstrukce prvního technologického celku ETI 1, které se týkaly přestavby na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Dva turbogenerátory 50 MW byly nahrazeny kondenzačními turbínami s regulovaným odběrem o výkonu 55 MW (TG2 a TG3). Současně byl vybudován rozvod tepla pro region Sokolovska a teplo začalo být dodáváno do okolních měst a obcí (Sokolov, Březová, Habartov, Bukovany, Svatava, Královské Poříčí). Celkový instalovaný výkon elektrárny se tak zvýšil na 522 MW.

V první útlumové vlně hnědouhelných elektráren na začátku devadesátých let byly odstaveny dva 100 MW bloky. Jeden na konci roku 1990, druhý na konci roku 1991. Počátkem roku 1992 měla elektrárna instalovaný výkon 322 MW. V roce 1998 byla odstavena jedna turbína 50 MW a instalovaný výkon klesl na 272 MW.

Nejvýznamnější investiční aktivity posledních let byly zaměřeny na splnění požadavků nové legislativy v ochraně vod a ovzduší před znečišťujícími látkami a na ekologické ukládání odpadů. Cílem rozsáhlého a finančně náročného programu Elektrárny Tisová bylo snížení emisí popílku, oxidu siřičitého, oxidů dusíku a oxidu uhelnatého na hodnoty nižší než stanovní zákon.

Naplňování programu začalo v roce 1992 instalací elektrického odlučovače se třemi sekcemi na bloku 100 MW v ETI 2 a náhradou kotlů K125 t/h ETI 1 za dva fluidní kotle o parních výkonech 350 t/h. Výstavba prvního fluidního kotle probíhala v letech 1993 - 1995 a na výstavbě se podílely akciová společnost Vítkovice a Ingeneering EVT Stuttgart. Druhý fluidní kotel byl stavěn v průběhu let 1995 - 1997. Jeho dodavatelem byla německá firma LLB-Lurgi Lentjes Babcock Energietechnik GmbH. Pro zapalování všech kotlů v elektrárně se v současné době používá zemní plyn.

U ETI 2 byla v letech 1995 - 1997 instalována odsiřovací jednotka na bloku 100 MW, která pracuje na principu mokré vápencové vypírky. Dodavatelem byla německá firma L.&C. Steinmüller GmbH.

Ekologizace Elektrárny Tisová byla završena realizací doprovodných staveb, které zabezpečují ekologické ukládání stabilizátů (vznikajících z tuhých zbytků po spalování uhlí) v úložišti a kompletní zneškodnění znečištěných odpadních vod z areálu elektrárny chemickou čistírnou odpadních vod. Mimo těchto velkých staveb probíhá průběžně modernizace zařízení elektrárny tak, aby odpovídalo současným trendům výroby elektřiny a tepla. [1]

## 1.4 Současný stav a technické parametry

ETI 1 se sběrníkovým uspořádáním tvoří dva fluidní kotle, každý o výkonu 350 t/h, jedna kondenzační, rovnotlaká, dvoutělesová turbína 57 MW, dvě turbíny 57 MW kondenzační, rovnotlaké, dvoutělesové, s jedním regulovaným odběrem páry a turbína 12,8 MW protitlaková, kombinovaná, jednotělesová.

ETI 2 s blokovým uspořádáním tvoří granulační kotel 330 t/h a kondenzační, rovnotlaká, třítělesová turbína 112 MW s přehříváním páry.

Každý turbogenerátor pracuje do jednoho vývodového transformátoru. Turbogenerátory ETI 1 jsou chlazeny vzduchem a turbogenerátor 100 MW bloku ETI 2 je chlazen vodíkem.

Vyvedení elektrického výkonu elektrárny do rozvodny Sokolov - Vítkov je prostřednictvím linek 110 kV u ETI 1 a linkou 220 kV u ETI 2.

Vyvedení dodávky tepla je prostřednictvím parní soustavy o jmenovitých parametrech 1,2 MPa, 240 °C. Roční výroba elektřiny se pohybuje okolo 1,6 TWh, dodávka tepla odběratelům okolo 1500 TJ.

Palivem je sokolovské hnědé uhlí, které je dopravováno kolejovou dopravou. Zdrojem technologické vody pro elektrárnu je řeka Ohře a též přilehlé odkaliště bývalého lomu Silvestr.

[1]

## 2 ETI 1

Každý turbogenerátor ETI 1 pracuje do jednoho vývodového transformátoru. Turbogenerátory ETI 1 jsou chlazeny vzduchem. Vyvedení elektrického výkonu elektrárny do rozvodny Sokolov - Vítkov je prostřednictvím linek 110 kV. [1, 2]

### 2.1 Turbogenerátory

Generátory jsou součástí turbosoustrojí číslo 1 ÷ 3 a slouží k výrobě elektrické energie. Generátor je chlazený vzduchem, chladicí oběh vzduchu je uzavřený, vzduch je chlazen vodním chladičem. K buzení generátoru slouží statické budící soupravy. Vyrobená elektrická energie je vyvedena na blokový transformátor a transformátor vlastní spotřeby bloku. Blokový transformátor napájí přes vývodovou kobku 110 kV samostatnou linkou sběrnou rozvodny Vítkov. Odbočka na vlastní spotřebu napájí blokovou rozvodnu vlastní spotřeby 6 kV. Pro připojení elektrických ochranných, měřících přístrojů a SBS slouží měřicí transformátory proudu (MTP) a napětí (MTN), které jsou součástí vývodu generátoru, vývodu 110 kV a odbočení z bloku. [2]

### 2.2 Fluidní kotle FK11, FK12

Atmosférický fluidní K12 je nedílnou součástí technologického procesu výroby elektřiny a tepla ve výrobě ETI 1, druhým kotlem v této výrobě je rovněž atmosférický fluidní kotel označený K11.

Kotle FK11 a FK12 se oba provozují do společného parovodu, což umožňuje velkou variabilitu provozu celé ETI 1. Nejčastější provoz ETI 1 je chod obou kotlů současně. Díky systému společného parovodu je však možné provozovat kotle jednotlivě v součinnosti s jakýmkoliv turbogenerátorem. [3]



### 2.2.1 Základní parametry FK11

FK11 je dvoutahový fluidní kotel s obdélníkovou spalovací komorou. Palivo je do kotle dávkováno párem zauhlovacích linek.

Parní výkon fluidního kotle 350 t/h

Výkon fluidního kotle 97,22 kg/s

Tepelný výkon fluidního kotle 262,13 MWt

Teplota přehřáté páry 505 °C

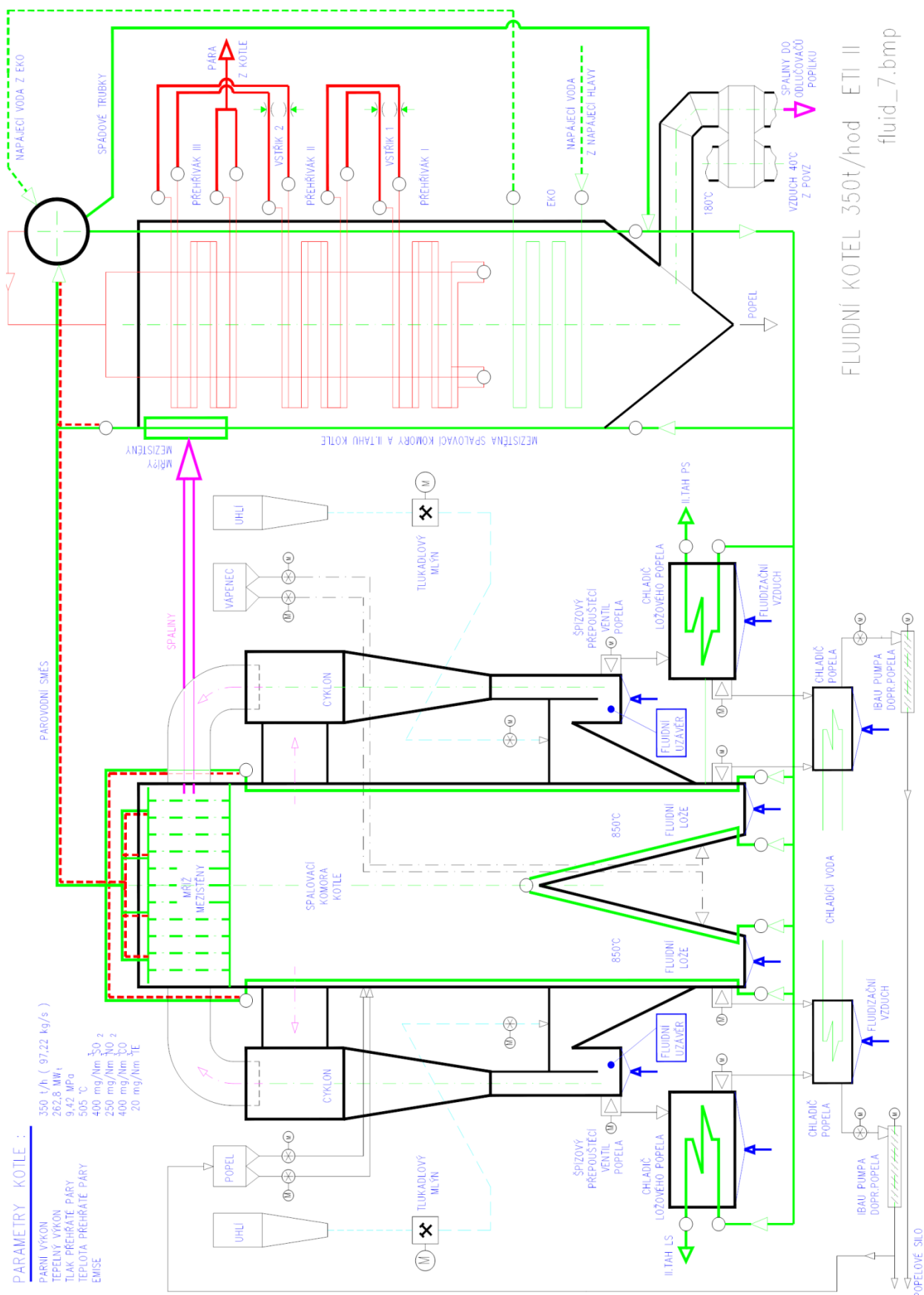
Max. odchylka přehřáté páry  $\pm 5$  °C

Tlak páry 9,42 MPa

Teplota napájecí vody 165 °C

### 2.2.2 Základní technické parametry FK12

FK12 je též dvoutahový fluidní kotel. Tento kotel je unikátní tvarem spalovací komory. Ta je rozdělena na dvě části. (Obr. 2.1) Kotel má čtyři zauhlovací linky, do každé části jsou zavedeny dvě. Tento tvar spalovací komory zlepšuje účinnost a dynamiku kotle. Značně však komplikuje ovládání. [3]



Obr. 2.2 Orientační schéma FK12 [3]

Tab. 2.1 Základní technické parametry FK12 naměřené při granulačních zkouškách [3]

Parametr	Jednotky	Garantováno	Naměřeno
Parní výkon fluidního kotle	t/h (kg/s)	350 (97,22)	splněno
Tepelný výkon fluidního kotle	MWt	262	splněno
Tlak páry	MPa	9,42 ±0,1	splněno
Teplota přehřáté páry	°C	505 +5	splněno
Teplota napájecí vody	°C	148/165	splněno
Teplota nasávaného vzduchu	°C	25	
Rozsah automatického řízení	% P <sub>im</sub>	40 ÷ 100	splněno
Minimální výkon bez najížděcího paliva	% P <sub>im</sub>	30	splněno
Vlastní spotřeba bez vnějších zařízení	kWh	4 954,0	4 853,6
Vlastní spotřeba celková při P <sub>im</sub>	kWh	6 286,0	5 637,0
Účinnost	%	92	93,4
Spalitelné látky v popílku do	%	1,5	splněno
Spotřeba vápence	kg/h	8450	splněno

### 2.2.3 Spalované palivo

V následující tabulce jsou uvedeny parametry dodávaného uhlí. Jak je z tabulky patrné, zejména rozmezí síry a popelnatosti paliva je poměrně velké.

Tab. 2.2 Parametry sokolovského uhlí spalované v elektrárně Tisová [3]

Výhřevnost Q <sub>i</sub> <sup>r</sup>	9,75 ÷ 12,75	MJ/kg
Voda původní W <sup>r</sup>	36,5 ÷ 40,0	%
Popel v sušině A <sup>d</sup>	20,2 ÷ 39,0	%
Popel v surovém uhlí A <sup>r</sup>	12,12 ÷ 23,40	%
Síra v sušině S <sup>d</sup>	0,60 ÷ 5,65	%
Síra v surovém uhlí S <sup>r</sup>	0,36 ÷ 3,39	%
Prchavá hořlavina V <sub>daf</sub>	52,0 ÷ 55,0	%
Obsah fluoru F <sup>d</sup>	250	ppm
Obsah chloru Cl <sup>d</sup>	600	ppm
Sypná hmotnost	700 ÷ 850	kg/m <sup>3</sup>
Měnitelnost dle VTI	1,4 ÷ 1,7	

### Granulometrie paliva dodávaného z dolů: 0 ÷ 40 mm

Nad 40 mm	max. 5,3 %
30 ÷ 40 mm	4,8 %
22 ÷ 30 mm	7,9 %
16 ÷ 22 mm	8,2 %
12 ÷ 16 mm	5,1 %
10 ÷ 12 mm	5,9 %
menší než 10 mm	63,1 %

**Spotřeba paliva při plném výkonu a účinnosti 92,8 %:**

Při průměrném palivu (11,87 kJ/kg) 84,24 t/h.

**Granulometrie uhlí do fluidní vrstvy:**

nad 10 mm	max. 1,7 %
8 ÷ 10 mm	2,5 %
4 ÷ 8 mm	9,4 %
2 ÷ 4 mm	15,0 %
1 ÷ 2 mm	18,2 %
0,5 ÷ 1 mm	20,3 %
0,25 ÷ 0,5 mm	15,2 %
pod 0,25 mm	17,7 %

**2.2.4 Vápenec****Jemnozrnný vápenec:**

Dle ČSN 72 12 20 druh JM5

Lokalita: Kotouč Štramberk (99,5 % CaCO<sub>3</sub>, 1,4 % MgCO<sub>3</sub>) nebo Čertovy schody

Doporučená granulometrie:

menší než 2 mm	100 %
menší než 0,1 mm	10 %
150 μm	průměrně 50%
180 μm	průměrně 80%
větší než 40 μm	90 %
vlhkost vápence	max. 1 %

**Hrubozrnný vápenec:**

- Materiál: drcený vápenec
- Zrnitost: 0 - 5 mm
- Vlhkost: 1 - 5 %
- Sypná hmotnost: 1,3 t/m<sup>3</sup>

## 2.2.5 Popeloviny z FK12

Jak je patrné z této tabulky, rozdělení popelovin se mění vzhledem k výkonu kotle. Při plném výkonu je více úletového popele. To je způsobeno množstvím a rychlostí proudění vzduchu. Při vyšším proudění vzduchu jsou unášeny i větší částice do druhého tahu a dále pak do filtrů. Tím pádem přibývá úletového popele a ubývá ložového.

Tab. 2.3 Rozdělení popelovin [3]

při plném výkonu 350 t/h	13 % ložový popel	87 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)
při výkonu 80 % (280 t/h)	40 % ložový popel	60 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)
při výkonu 40 % (140 t/h)	30 % ložový popel	70 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)

### Množství popelovin při plném výkonu a průměrném palivu:

ložový popel 3,2 t/h

popel z filtrů a druhého tahu 22,0 t/h

Složení popelovin:

SiO<sub>2</sub> 50,30 %

MgO 0,78 %

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 28,42 %

Na<sub>2</sub>O 0,50 %

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6,74 %

SO<sub>3</sub> 1,40 %

TiO<sub>2</sub> 7,00 %

K<sub>2</sub>O 1,40 %

CaO 2,10 %

## 3 Základní popis fluidního spalování

Funkčním základem spalování a podmínkou vzniku spalovacího procesu vůbec je přívod částic oksylichovadla k částicím paliva a současný přívod tepla, při kterém je možný průběh chemických spalovacích reakcí.

Snaha spalovat uhlí s nízkou výhřevností a současně i s různorodými vlastnostmi zapříčinila vývoj systému, který se vyznačuje nízkým podílem hořlaviny v aktivní zóně spalování při současném dlouhém a částečně říditelném setrvání částic paliva v této zóně. Tímto systémem se stala fluidní spalovací technika. [3, 4, 8]

### 3.1 Fluidizace

Fluidizace je proces, kdy vrstva částic je uvedena do fluidního stavu prostřednictvím stoupajícího plynu (vzduchu). Tento fluidní stav má řadu zajímavých technických vlastností.

Spalovací komory s fluidním ložem mají několik výhod, zahrnující jejich jednoduchou konstrukci, flexibilitu ve věci použitého druhu paliva a vysokou spalovací účinnost při nízké teplotě spalování, která minimalizuje vývin termického NO<sub>x</sub>. Hlavní výhodou fluidního spalování je možnost odstraňování SO<sub>2</sub> již ve fluidním loži užitím přidávaného vápence nebo dolomitu.

Fluidní kotle jsou vhodné pro střídavý provoz, protože mohou být rychle najety po noční odstávce, nebo dokonce i po víkendové odstávce.

Fluidní lože je výborný „mixer“ pevných částic, schopný zajistit homogenní provozní teplotu a dobrý kontakt mezi palivem a plynovou fází.

Fluidní vrstva se chová jako kapalina, působí na stěny ohniště hydrostatickým tlakem (platí zde Pascalův zákon). Chování fluidní vrstvy se ale mění se stupněm promísení tuhých částic s tlakovým plynovým médiem. [3, 4, 8]

#### 3.1.1 Princip fluidizace

Když je stabilní lože vystaveno stoupajícímu proudu plynu, tak jednotlivé částičky mají snahu postupně se oddělovat a jejich expanze se velice rychle zvyšuje. Pokles tlaku působícího na stěny ohniště se zvyšuje s rostoucím tokem plynu (vzduchu).

V případě klasického uhelného fluidního kotle je ložová vrstva pevných látek tvořena z jemnozrnného materiálu, v našem případě popelem, hnědým uhlím a vápencem, a je profukována ohřátým primárním vzduchem takovou rychlostí, že dochází k tzv. fluidizaci. Spalování uhlí probíhá při cca 850 °C. Část proudu vzduchu je přiváděna přes tryskové dno spalovací komory - primární vzduch, zbývající vzduch je přiváděn v kónickém rozšíření ohniště (sekundární vzduch)



Obr. 3.3 Tryskové dno spalovací komory [6]



Obr. 3.2 Pohled ke dnu kotle v provozním stavu [7]

Cirkulační fluidní lože pracuje při rychlostech, které korespondují s režimem pneumatické dopravy. Částice jsou sbírány proudem vzduchu, recirkulovány a ochlazovány útroby kotle. Větší částičky u stěn spalovací komory jsou brzděny třením o stěny a padají zpět ke dnu komory, dochází k tzv. vnitřní cirkulaci. Částičky proudící těsně u stěn zvyšují přestup tepla do trubkové stěny. Expanzí spalin je převážná část pevných částiček unášena ven ze spalovací komory do cyklónu a tím vzniká vnější cirkulace. Tato vnější a ve spalovací komoře vznikající vnitřní cirkulace pevných částic vede k velmi homogennímu rozdělení teploty v celé spalovací komoře.

Protože pracují při vysokých lineárních rychlostech, jsou fluidní cirkulační kotle poměrně vysoké, aby umožnily přiměřenou dobu pobytu částiček a spalin ve spalovací komoře. V klasických ohništích se přenos tepla realizuje převážně sáláním za teplot nad 900 °C. Naproti tomu fluidní ohniště (charakterizováno jako nízkoteplotní) pracuje pouze do těchto teplot. Tato zdánlivá nevýhoda je vyvážena tím, že přestup tepla konvekcí (prouděním) je ve fluidní vrstvě řádově vyšší, než je konvekce v plynech. To dovoluje minimalizovat výhřevné plochy v oblasti fluidní vrstvy. [3, 4, 8]

Velký specifický povrch částic paliva zintenzivňuje průběh odevzdávání tepla a hmoty mezi:

- částicemi a spalinami (odsířování, dohořívání),
- částicemi a výhřevnými plochami (přechod tepla),
- částicemi navzájem (vyrovnávání teploty).

Mezi I. a II. tahem kotle ve směru proudění spalin jsou zabudované cyklóny, ve kterých se oddělí hrubá frakce ještě nespáleného uhlí a také části popela. Pevné látky vynášené spalinami z fluidní spalovací komory vstupují do cyklónu rychlostí, která umožňuje odloučení částiček větších než 0,1 mm. Tyto oddělené pevné částice jsou opět přivedené buď přímo anebo přes průtokový chladič fluidní vrstvy zpět do spalovací komory, částičky menší než 0,1 mm odchází z cyklónu se spalinami do druhého tahu fluidního kotle.

Z obou cyklónů padají částičky větší než 0,1 mm dolů do svodky a odtud do fluidních uzávěrů, nebo-li sifonů. Kotel má dva cyklóny, dvě svodky a dva fluidní uzávěry, které dále rozdělují tok popela buď zpět do fluidní vrstvy pomocí dvou svodek, nebo do 4 chladičů fluidní vrstvy.

Za cyklónem jsou spaliny ochlazené v následných teplosměnných plochách. To se děje ve svazcích přehříváků a ekonomizéru (Obr. 2.1 EKO), zavěšených v proudu spalin a v rotačním ohříváku vzduchu, kde jsou spaliny ochlazené z teploty cca 205 °C na teplotu cca 130 °C.



Teplu je zde odevzdávané primárnímu a sekundárnímu vzduchu. Ochlazené spaliny jsou pak vyčištěny v textilním filtru a dopraveny do komína č. 1.

Základem fluidní vrstvy jsou dvě trysková dna, která jsou tvořena výparníkem a mezi trubkami výparníku je umístěno  $2 \times 310$  trysek zvláštní konstrukce, které mají rozteč  $255 \times 160$  mm. Do trysek je dodáván primární vzduch o teplotě  $163 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku 17 kPa.

Další trysková dna jsou ve dvou fluidních uzávěrech (sifonech), celkem  $2 \times 56$  trysek typu „B“, do kterých je dodáván vzduch z kotelny pomocí dmychadel o tlaku 45 kPa a teplotě cca  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Další trysková dna jsou ve 4 chladičích fluidní vrstvy. V každém chladiči je celkem 108 trysek typu „D“ a „E“, do kterých se vhání tlakový vzduch z dmychadel o teplotě cca  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku 45 kPa.

Kanály do cyklónů, cyklóny, svodky, sifony a svodky zpět do fluidní vrstvy spalovací komory jsou opatřeny těžkou zadržkou, protože v celém cirkulačním okruhu je teplota  $820 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tento celý okruh tvoří princip atmosférického cirkulačního fluidního spalování. Ve srovnání s práškovým topením umožňuje, že každá částice uhlí, každá částice vápence může několikrát oběhnout tímto okruhem a tím má dostatek času na dokonalé vyhoření u hořlavých částic a u vápence na dokonalé vypálení na vápno a tak účinné sloučení vápna s kyslíčkem siřičitým, vznikajícím při spalování síry z uhlí. Každá částice má možnost oběhnout  $3 \times$  až  $5 \times$ . Cirkulací hořlavých částic v cirkulující fluidní vrstvě dochází k dokonalému vyhoření.

Částice uhlí se vyhoříváním ve vrstvě zmenšují a malé částice s hořlavinou o velikosti do 1 mm ulétají z vrstvy. U tohoto principu spalování není třeba jemné mletí uhlí, stačí zrnění  $0 \div 5$  mm.

Palivo je do spalovací komory přiváděno pomocí 4 dopravních cest – do každého fluidního uzávěru ústí dvě svodky od rotačních podavačů – připojovací rozměry jsou  $400 \times 500$  mm. V místě zavedení paliva je přiveden těsnící vzduch. Palivo padá na skluz v sifonu do proudu cirkulujícího popela a spolu s ním vstupuje do fluidní vrstvy. Již během průchodu nového paliva fluidním uzávěrem dochází k jeho vysušování, po vstupu do fluidní vrstvy začíná spalování.

Konstrukce atmosférického fluidního kotle dle LURGI se vyznačuje velmi dokonalým spalováním. Podle měření je nedopal u tohoto kotle neobvykle nízký. V popílku z textilního filtru byla naměřena nejnižší hodnota u uhelných kotlů a to  $0,05 \div 0,07 \%$ . Dokonalé spalování je umožněno štíhlou a vysokou spalovací komorou (výška cca 32 m uvnitř komory.) [3, 4, 8]

## 4 Vápencové hospodářství FK12

Vápenec nebo-li uhličitan vápenatý  $\text{CaCO}_3$  je do kotle dávkován za účelem odsíření spalin. Vypálením při vhodné teplotě (800 - 900 °C) se přemění na oxid vápenatý tedy  $\text{CaO}$ , které se s velkou účinností váže na kyslíčnick sířičitý vznikající při hoření uhlí. Tato chemická reakce zajistí dostatečné odsíření spalin.

### 4.1 Jemnozrnný vápenec



Obr. 4.4 Jemnozrnný vápenec

#### 4.1.1 Stáčení jemnozrnného vápence

Stáčení vápence a vápna z železničních přepravníků Raj 451 je prováděno ze stáčecích míst železniční vlečky ETI. Posun přepravníků Raj 451 po vlečce (koleje 6a, 4a, 2c) je prováděn nezávislým posunovacím mechanismem AV 211.

Stáčiště vápence pro fluidní kotle je umístěno za sily vápence QVB10 a 30. Stáčení je prováděno z koleje 6a.

Vápenec je stáčen pneumaticky pomocí tlakového vzduchu do sil QVB10, QVB20 a QVB30. Vzduch pro stáčení je dodáván z kompresoru ZE41-250, umístěného v budově kotelny. Protože množství vzduchu z kompresoru postačuje na stáčení 2 – 3 komorových podavačů („baněk“) Raj, je jako pomocný používán vzduch z rozvodu vzduchu 0,3 MPa fluidních kotlů odbočkou DN 100 z potrubního mostu. [3]

#### 4.1.2 Vnější sila jemnozrnného vápence

Sila jsou určena pro meziskladování mletého vápence pro fluidní kotle K11 a K12.

Jsou umístěna vně objektu kotelny u kolejové vlečky, provedením jsou svařence z ocelových plechů s vlastní nosnou konstrukcí. Objem sil QVB10 a 20 je 1 000 m<sup>3</sup>, objem sila QVB30 je 750 m<sup>3</sup>.

Stáčení vápence do zásobníků se provádí pneumaticky z vagónů, popřípadě z autocisteren.

Vstup stáčecích potrubí vápence je stropem zásobníků. Do QVB10 a 20 je zaústěno po dvou stáčecích potrubích. Do QVB30 jsou zaústěny 4 ks stáčecích potrubí.

Odvod vápence ze zásobníků je gravitační (vlastní vahou), řízený výpustnými hrdly do komorových podavačů.

Na stropu sila QVB 20 je umístěna filtrační jednotka FTI 4/35 – je společná pro sila QVB20 a 10. Na stropu sila QVB 30 je umístěna filtrační filtr CARM V 20/10 F5. [3]

#### 4.1.3 Doprava z QVB10, 20 a 30

Provádí se tlakovým vzduchem 0,6 MPa prostřednictvím komorového podavače QVC10, QVC20 a QVC30 a k němu příslušných membránových ventilů. Tyto ventily jsou ovládány tak, aby byl podavač naplněn ze sila, natlakován dopravním vzduchem a následně vyprázdněn do cílového vnitřního sila.

Komorové podavače QVC10, QVC20 a QVC30 jsou umístěny pod sily QVB10, 20 a 30 v samostatných zděných objektech.

Podavače jsou připojeny na spodní část sil svody DN 250 s ručními uzavíracími šoupátky (DN 250). Vápenec do podavačů padá gravitačně přes zvonový (QVCAA301) a plnicí uzávěr (QVCAA302) ovládaný pneumatickými pohony s hlídáním koncových poloh. Mezi uzávěry jsou tkaninové dilatace.

Vlastní komorový podavač je nádoba svařená z plechů. Ve spodní části podavače je přírubově upevněna provzdušňovací přepážka s provzdušňovací tkaninou. Uprostřed přepážky je vřazena trubka, kterou padá provzdušněný vápenec do dopravního potrubí z KP přes materiálovou clonu. V krajní obvodové části přepážky je přívod tlakového vzduchu. V horní části podavače je kontrolní víčko.

Z komorových podavačů pod QVB10, 20 a 30 je vápenec potrubím přefoukán přes systém klapek a rozboček do vnitřních sil FK11 i FK12. [3]

#### **4.1.4 Vnitřní zásobník jemnozrného vápence pro FK12 (EMK01)**

Zásobník vápence je kapacitně navržen tak, aby zabezpečoval 16hodinový provoz kotle bez doplňování z vnějších zásobníků za předpokladu garančního složení paliva a dodržování garantovaných emisí. Slouží ke skladování potřebného vápence pro provoz K12. Je umístěn v prostoru kotle K12 mezi podlažím +23,2 m a +38,0 m. Je to ocelový svařenec o  $\varnothing$  5 200 mm a výšce válcové části 8 800 mm se dvěma kuželovými výsypkami o výšce 2 563 mm, jejichž výstupní hrdla o  $\varnothing$  400 mm ústí ve výšce +25,438 m, uložený na ocelové nosné konstrukci podlaží +38,0 m. Zásobník vápence má objem 200 m<sup>3</sup> a obsahuje váhově max. 300 tun vápence. [3]

#### **4.1.5 Doprava jemnozrného vápence do kotle**

Vápenec je do kotle dopravován třemi linkami dopravy vápence. Pneumatické linky EMK21, 22 a 23 jsou dimenzovány na výkon po 11 t/h, mechanická doprava kusového vápence na 12 t/h. Regulace množství vápence linkami 21, 22, 23 je řízena řídicím systémem v závislosti na obsahu SO<sub>2</sub> ve spalinách, s možností ručního dálkového řízení. [3]



Obr. 4.2 Šnekové dopravníky IBAU (Fullerova čerpadla) vápence do kotle FK12

Směs vápence a vzduchu z Fullerových čerpadel je dopravována 3 ks potrubí DN 125. Potrubí vedou podél stěny sloupů „B“ pod kótou +8 m do úrovně zadní stěny druhého tahu.

Trasy EMK21 a EKM22 jsou zaústěny do klínu (středu) spalovací komory.



Obr. 4.3 Zaústění tras vápence do klínu kotle FK12

Trasa EMK23 je vedena v prostoru za kotlem pod plošinu +8 m, kde se rozbočuje a pomocí tlakových pogumovaných hadic vstupuje do obou okének zadní stěny lože.



Obr. 4.4 Zaústění trasy vápence EMK23 do kotle FK12

## 4.2 Hrubozrný (kusový) vápenec

V roce 2010 byl na kotli K12 instalován systém pro dávkování hrubozrného vápence. Tato technologie byla zřízena za účelem úspory nákladů na odsíření. Návratnost poměrně vysokých investičních nákladů měla zajistit šestinová cena hrubozrného vápence oproti jemnozrnému vápenci.



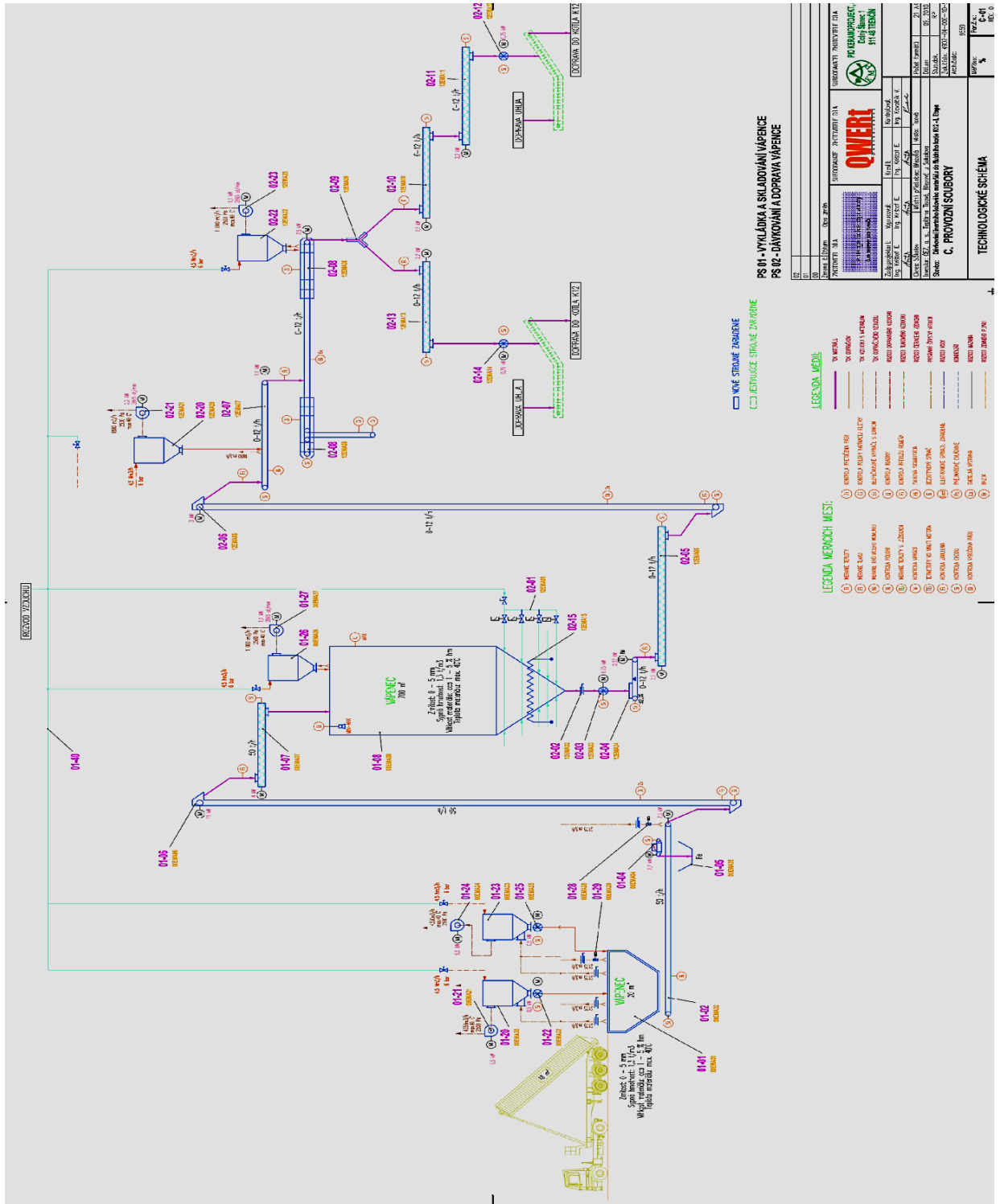
Obr. 4.5 Hrubozrný (kusový) vápenec

#### 4.2.1 Základní technická charakteristika hospodářství hrubozrného vápence

Celá linka je rozdělena do dvou logických celků - příjmu + skladování vápence a dávkování + dopravy vápence do kotle. Příjem a skladování je kapacitně navrženo na výkon 50 t/hod a celkovou skladovací kapacitu sila 1 000 t vápence. Dopravní trasa ke kotli je navržena na přepravní výkon 12 t/hod.

Celou technologii tvoří šnekové dopravníky, korečkové elevátory, pásové dopravníky, systém odsávání a filtrace prachu, skladovací silo, svodky, nosné a obslužné konstrukce, příslušenství a výzbroj a ovládací místa. [3, 5]





Obr. 4.6 Celý systém pro hrubozrný (kusový) vápenný [5]

**Šnekové dopravníky:**

Konstrukce je samonosná korýtkovitá, v určených místech jsou dopravníky podepřené. Šnekovnice je utěsněna šňůrovým těsněním na prostupech z prostoru dopravy materiálu, ložiska jsou umístěna mimo na pomocné konstrukci. Pohon je zajištěn násuvnou převodovkou, případně patkovou převodovkou s elektromotorem a spojkou. [3, 5]

**Pásové dopravníky:**

Pásové dopravníky jsou určené pro dopravu sypkých hmot a jsou navrženy na šířku dopravního pásu 500 mm, resp. 600 mm/150 mm a provozují se při rychlosti 0,5 a 0,7 m/s. Dopravník EMA07 je umístěn na úrovni +17 m na spojovacím mostě mezi silem vápence a objektem kotelny. Jedná se o pásový dopravník klasické podepřené konstrukce s poháněcí a vratnou napínací stanicí. [3, 5]

**Korečkové elevátory:**

Korečkové elevátory použité v technologii jsou shodné konstrukce s rozdílnými přepravními výkony. Jedná se o pásové odstředivé elevátory s oddělenými dopravními tubusy, dopravní a vratné větve. Základní konstrukční celky tvoří poháněcí stanice, vratná stanice a střední část sestavená ze shodných segmentů. Materiál je dopravován v ocelových korečcích objemu cca 1,5 l se zesílenou hranou, upevněných na pryžovém pásu. Pohon dopravníků zajišťují násuvné elektropřevodovky, pás šířky 200 mm je unášen lamelovou poháněcí kladkou a napínán spodní lamelovou kladkou. [3, 5]

**Rotační uzávěry:**

Rotační uzávěr je zařízení sloužící k řízenému uzavření a regulaci toku materiálu s možností úplného tlakového oddělení částí dopravní cesty bez nutnosti přerušení plynulosti materiálové toku. V technologii jsou použité lamelové rotační uzávěry s výplachem tlakovým vzduchem, resp. v provedení pro tlakové oddělení stávající technologie v místě zaústění nové dopravy vápence. Pohon zajišťují násuvné elektropřevodovky. [3, 5]

**Dávkovací pásová váha:**

Dávkovací pásová váha slouží k přesné regulaci množství materiálu odebíraného ze sila pro potřeby kotle. Jedná se o pásový dopravník skříňové konstrukce vybavený tenzometrickým systémem průběžného vážení dopravovaného materiálu a autonomní vyhodnocovací elektronikou s kalibrací a systémovým rozhraním plně integrovaným do řídicího systému technologie. Rychlost dopravního pásu váhy je elektronicky regulována podle aktuálních potřeb dopravy a je svázána s podávacím výkonem předsunutého rotačního uzávěru sila. [3, 5]

**Ovládání:**

Technologie dopravy je řízena z velínu kotle K12 z operátorských panelů, a to v automatickém nebo ručním režimu. Každé jednotlivé zařízení má v blízkosti poháněcí jednotky také umístěnu deblokační skříňku s možností přepnutí do režimu místního ovládání a ručního zapnutí a vypnutí provozu. Veškeré bezpečnostní prvky jsou funkční i v režimu ovládání z místa. [3, 5]

**4.2.2 Manipulace hrubozrnného vápence ze složiště do kotle FK12****Příjmové místo:**

Dodávky vápence jsou realizovány nákladními automobily s návěsy. Doprava musí od dodavatele k příjmovému místu za všech podmínek zabezpečit, že dopravovaný materiál nebude negativně ovlivněn zejména vlhkostí a dopravou nedojde k ovlivnění životního prostředí, tzn. návěs musí být vhodně zaplachtován. Před příjmovým objektem je vybudována manipulační plocha pro najíždění a otáčení automobilů k příjmové násypce. Automobily k násypce nacouvají. Na objektu příjmu je umístěn semafor signalizující připravení příjmového místa k plnění. Pokud je na semaforu červená, může řidič najet do pozice pro vyprázdnění, nesmí ovšem za žádných okolností provést sklopení. Po najetí dopravní linky příjmu vápence se semafor automaticky přepne na zelenou. To je základní signál pro řidiče, že je možné začít skládat materiál. [3, 5]

**Pásový podavač EMA02AF001:**

Z příjmové násypky je materiál souvisle odebírán pásovým podavačem. Regulace množství odebíraného materiálu je hradítkem na přední stěně násypky. Hradítko se ovládá ručním kolem. [3, 5]

**Magnetický separátor EMA04AF001:**

Nad pásovým podavačem je příčně zavěšen permanentní magnetický separátor feromagnetických částic. [3, 5]

**Korečkový elevátor EMA06AF001:**

Z pásového vynašeče přechází materiál přes odsávanou svodku vybavenou hlídačem závalu do vstupní svodky korečkového elevátoru EMA06. Nasypáváním do vstupní svodky dochází k plnění korečků a zároveň k zaplňování prostoru spodní stanice elevátoru, odkud je materiál korečky odebírán a vynášen do sila EMA08. (Obr. 4.6) [3, 5]

**Silo vápence EMA08BB001:**

K uložení zásoby vápence slouží válcové silo s kuželovou spodní částí. Objem sila je cca 700 m<sup>3</sup>. Konstrukce je skořepinová s horizontálními výztužnými profily. (Obr. 4.6) [3, 5]



Obr. 4.7 Silo pro skladování hrubozrnného vápence pro FK12

#### **Rotační podavač (turniket) 12EMA03AB001:**

Rotační podavač pod silem slouží k dávkování materiálu na pásovou váhu. Je řízen požadavkem váhy na dodávku materiálu a pracuje v "pulzním" režimu, tzn., pracuje cyklicky. (Obr. 4.7) [3, 5]

**Pásový dopravník s váhou 12EMA04AF001:**

Pásová váha Schenck slouží k dávkování požadovaného množství vápence do dopravní cesty. Je řízena vlastním řídicím systémem na základě aktuálního požadavku na dodávané množství z řídicího systému technologie. Množství materiálu je ovlivňováno řízením rychlosti pásu váhy v kombinaci s rychlostí podávání rotačního podavače. (Obr. 4.7) [3, 5]



Obr. 4.8 Dávkovací turniket pod silem EMA08

**Šnekový dopravník pod silem 12EMA05AF001:**

Šnekový dopravník slouží k dopravě odváženého toku materiálu k elevátoru. Dopravník je vybaven snímačem otáček šnekovnice a hlídačem závalu vstupní svodky. [3, 5]

**Korečkový elevátor 12EMA06AF001:**

Ze šnekového dopravníku přechází materiál do vstupní svodky korečkového, v pořadí druhého elevátoru. Odtud je materiál korečky odebírán a vynášen do pásového dopravníku 12EMA07AF001. [3, 5]

**Pásový dopravník 12EMA07AF001:**

Pásový dopravník je umístěn na spojovacím mostě a slouží k přepravě materiálu od elevátoru na hadicový dopravník. Materiál je na dopravník nasypáván svodkou z elevátoru, která je vybavena hlídačem závalu. (Obr. 4.6) [3, 5]

**Hadicový dopravník 12EMA08AF001:**

Hadicový dopravník slouží k dopravě materiálu z prostoru vstupu technologie do prostoru kotelny ke kotli K12 do ruční rozdělovací klapky. [3, 5]

**Rozdělovací klapka 12EMA09:**

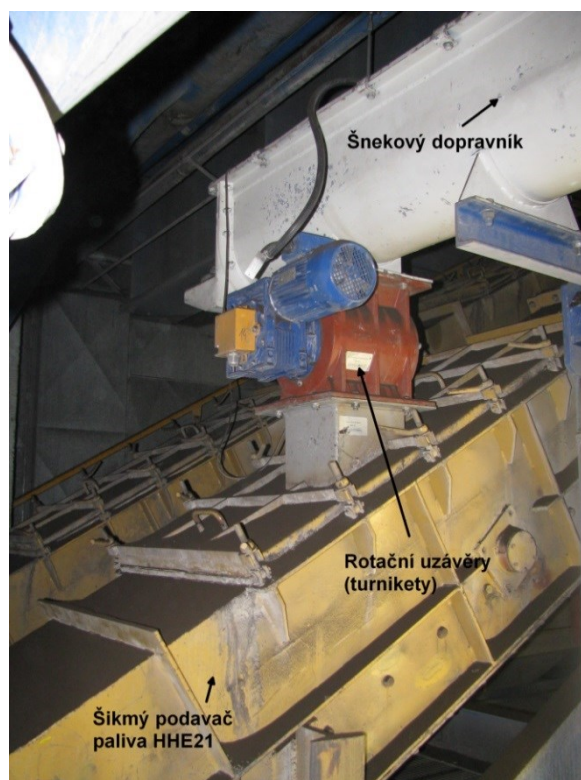
Ruční rozdělovací klapka slouží k rozdělování toku materiálu rovnoměrně do dvou šikmých zauhlovacích dopravníků kotle K12. (Obr. 4.8) Klapka ústí do šnekových dopravníků 12EMA10(11)AF001 a 12MA13AF001. [3, 5]



Obr. 4.9 Ruční rozdělovací klapka

**Šnekové dopravníky 12EMA10(11)AF001 a 12MA13AF001:**

Šnekové dopravníky slouží k dopravě materiálu z rozdělovací klapky k šikmým zauhlovacím dopravníkům HHE21,41. EMA13 dopravuje vápenec přes turniket EMA14 do HHE41. EMA10 dopravuje vápenec přes šnek EMA11 a turniket EMA12 do HHE21 (Obr.4.9) [3, 5]



Obr. 4.10 Zaústění vápence do zauhlovací linky



Zauhlovacími linkami je pak vápenec s palivem zaveden do spalovací komory, kde začíná jeho funkce „odsířování“.

## 5 Zkoušky odsíření hrubozrnným vápencem

### 5.1 Základní údaje vztahující se ke zkouškám

V Elektrárně Tisová ETI1 jsou v současné době instalovány dva atmosférické fluidní kotle o výkonu 2x350 t/h páry. V kotlích je spalováno hnědé uhlí o výhřevnosti cca 11,9 MJ/kg, odsířování kotlů se děje dávkováním vápence do spalovací komory.

Zatímco na kotli FK11 je do spalovací komory dávkován jen klasický jemný vápenec, do kotle FK12 se kromě tohoto jemnozrnného vápence také od roku 2010 dávkuje hrubozrnný vápenec. Kotel FK12 vykazuje dlouhodobě zvýšený podíl Ca/S a to jak proti obvyklým hodnotám, tak oproti kotli K11. Dále dle laboratorních rozborů byl dlouhodobě pozorován vysoký podíl nezreagovaného vápence v tuhých zbytcích.

Vzhledem k tomuto bylo rozhodnuto o provedení zkoušek s odsířením jen pomocí hrubozrnného vápence. Tyto zkoušky proběhly v termínu 13-26. 5. 2014. Během zkoušek se projeví problémy s kapacitou linek dávkování hrubozrnného vápence do kotle (při vyšších výkonech se ucpávaly), proto byl po dobu zkoušek do kotle dávkován i jemnozrnný vápenec. Nebylo totiž možné po dobu zkoušek překračování emisních limitů. Toto mělo za důsledek značné zkomplikování prováděných zkoušek. [3, 4, 5]

#### 5.1.1 Popis stávajícího stavu při zkouškách

Fluidní kotel 12 je atmosférický fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou spalující hnědé uhlí. Odsíření na hodnotu cca 450 mg/Nm<sup>3</sup> je provedeno přímo ve spalovací komoře pomocí dávkování jemnozrnného vápence.

Parametry, palivo (Kap. 2.2.3) a vápenec, (Kap. 2.2.4) na které byl kotel FK12 navrhován, jsou prakticky stejné jako v případě kotle FK11.

Do kotle (do paliva) se v současnosti dávkuje rovněž hrubozrnný vápenec. Granulometrické složení vápence není výrobcem jednoznačně určeno.

Z dalších údajů o kotli K12 je zajímavé výrobcem uváděné rozdělení tuhých zbytků spalovacího procesu v závislosti na výkonu kotle. [3, 4, 5]

Tab. 5.1 Rozdělení popelovin [3]

při plném výkonu 350 t/h	13 % ložový popel	87 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)
při výkonu 80 % (280 t/h)	40 % ložový popel	60 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)
při výkonu 40 % (140 t/h)	30 % ložový popel	70 % popel z filtrů (vč. 2. tahu)

Spalovací vzduch je nasáván primárním a sekundárním ventilátorem buď z venku, nebo pod střechou. V sání ventilátorů je umístěn rovněž parní ohřívák vzduchu (POV). Rotační ohřívák vzduchu LJUVO je uspořádán tak, že sekce sekundárního vzduchu (nižší tlak) je rozdělena na dvě půlky, mezi kterými je umístěna sekce primárního vzduchu (vyšší tlak). Toto řešení mělo přinést snížení přefuku vzduch – spaliny na LJUVO. Projektovaná hodnota přefuku činí 4,75 Nm<sup>3</sup>/s, pokles CO<sub>2</sub> ve spalinách byl předpokládán 0,9 %.

Množství vzduchu je regulováno dle výkonu kotle tak, aby obsah kyslíku ve spalinách činil cca 3,9% (vlhké spaliny) při plném výkonu kotle.

Vychlazené spaliny jsou vedeny do tkaninového filtru (filtrační plocha 12 248 m<sup>2</sup>), ve kterém je odloučen popílek, a následně jsou vedeny přes kouřový ventilátor do komína k rozptylu.

Palivo je do kotle vedeno čtyřmi skluzy oddělenými turnikety. Jemnozrnný vápenec je do kotle dopravován třemi Fullerovými čerpadly. Výkon každé trasy dopravy vápence činí cca 12,5 t/h. Navíc je na kotli instalováno dávkování hrubozrnného vápence přímo do dvou ze čtyř palivových skluzů (zauhlovacích linek) rovněž o výkonu cca 12,5 t/h.

Ložový popel je z kotle odváděn přes dva chladiče popela (o teplotě max. 160°C za chladičem) a následně Fullerovými čerpadly do sil. Z každého chladiče je vedena jedna pneumatická dopravní trasa o výkonu 12,5 t/h.

Popílek je ze spalin odlučován v tkaninovém filtru, který má šest výsypek. Pod filtrem je umístěn mezizásobník popílku, do kterého je přímo sveden popílek ze dvou výsypek, z dalších výsypek je popílek do mezizásobníku dopravován pomocí dvou redlerů. [3, 4, 5]

## 5.2 Průběh zkoušky

Vlastní zkoušky proběhly v termínu 13-26. 5. 2014. Během zkoušek měl být do kotlů dávkován jen hrubozrnný vápenec v množství, aby bylo dosaženo emisního limitu. Již první

den zkoušek se ovšem objevily problémy s dávkováním hrubozrnného vápence, linky se již při výkonech okolo 9 t/h začaly ucpávat a musely být nahrazovány dávkováním vápence jemnozrnného. Vzhledem k opakujícím se problémům s ucpáváním linek bylo rozhodnuto o pokračování zkoušek s permanentním dávkováním jemného vápence, takže během zkoušek byl do kotle nadávkován vápník (vztaženo na čistý Ca) z hrubozrnného : jemnozrnnému v poměru padesátitřetí procent ku čtyřicetisedmi procentům.

### 5.2.1 Výstupní hodnoty zkoušky

Spotřeby uhlí, vápence a výkon kotle během zkoušek jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.2 Spotřeby uhlí a vápence v poměru k výkonu kotle

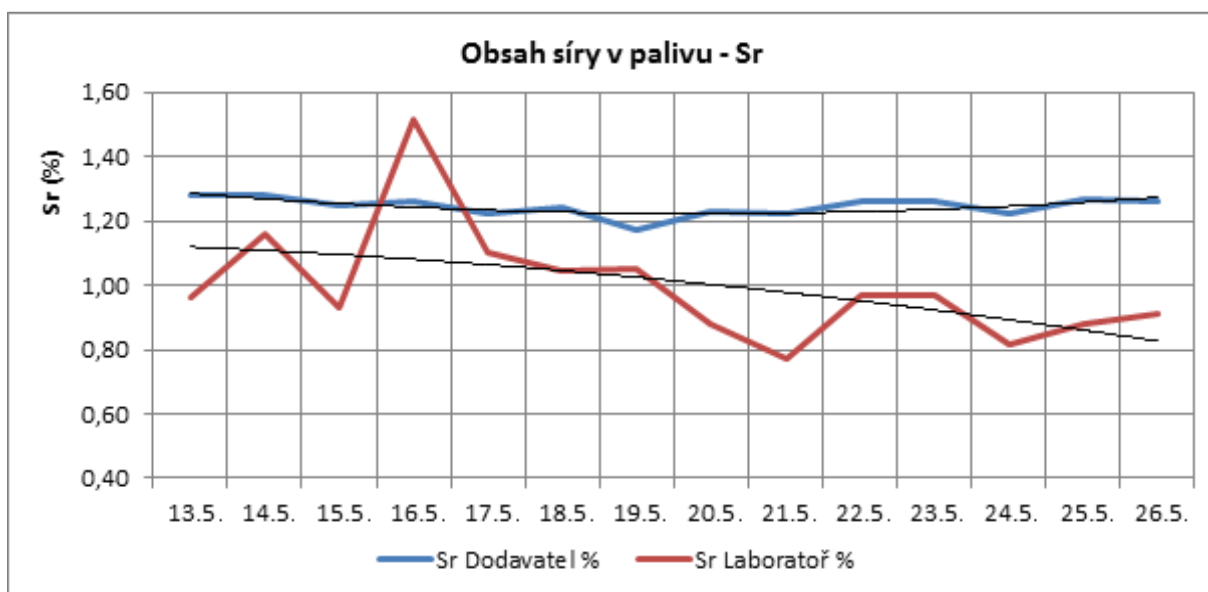
Datum	Spotřeba uhlí K12 [t]	standartní vápencec [t]	Kusový vápencec [t]	Výkon kotle K12 [t/hod]
13. 5.	1420	65	232	228
14. 5.	1710	150	168	283
15. 5.	1560	254	294	311
16. 5.	1390	151	255	304
17. 5.	1470	92	130	303
18. 5.	1340	194	280	298
19. 5.	1610	31	107	300
20. 5.	1500	275	206	304
21. 5.	1640	88	152	298
22. 5.	1540	77	242	296
23. 5.	1260	184	217	301
24. 5.	1430	99	200	228
25. 5.	1300	66	90	227
26. 5.	1400	140	59	281
Průměr	20 570	1 866	2 634	283

Zároveň byla sledována výhřevnost paliva, obsah vody, popela a síry v surovém palivu. Zatímco v případě výhřevnosti vody a popela jsou údaje dodavatele uhlí a laboratoře ETI téměř shodné, v případě obsahu síry se údaje ETI a dodavatele liší – viz. následující tabulka.

Tab. 5.3 Hodnoty vzorků paliva odebraných při zkouškách

	Q <sub>ir</sub>	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup> Dodavatel	S <sup>r</sup> Laboratoř
Datum	MJ/kg	%	%	%	%
13. 5.	11,31	35,80	21,48	1,28	0,96
14. 5.	11,45	35,20	22,10	1,28	1,16
15. 5.	11,36	36,47	20,71	1,25	0,93
16. 5.	11,86	36,55	19,11	1,26	1,51
17. 5.	11,83	36,97	19,03	1,22	1,11
18. 5.	11,92	35,54	20,42	1,24	1,04
19. 5.	11,58	37,85	18,73	1,17	1,05
20. 5.	11,57	36,85	19,97	1,23	0,88
21. 5.	11,82	36,30	20,06	1,22	0,77
22. 5.	11,33	36,88	20,44	1,26	0,97
23. 5.	11,34	36,28	20,84	1,26	0,97
24. 5.	11,09	35,65	21,94	1,22	0,82
25. 5.	11,82	36,18	19,76	1,27	0,88
26. 5.	11,32	35,88	21,50	1,26	0,91
Průměr	11,54	36,32	20,44	1,24	1,00

Jak je patrné z této tabulky, činí rozdíl ve výsledcích odebraných vzorků laboratoří dodavatele a laboratoří ETI na obsah síry cca 24 %. Porovnání obsahu síry dle údajů od dodavatele a dle údajů laboratoře je provedeno v následujícím grafu.



Obr. 5.1 Porovnání laboratorních výsledků od dodavatele a laboratoře ETI

Předpokládá se, že dodavatel paliva má lépe vybavený systém vzorkování paliva a provádí i přesnější rozbor. Vzhledem k tomu je v následujících kapitolách pracováno především s rozboru od dodavatele paliva.

Na základě vlastností paliva ( $W$ -obsah vody,  $A$ -obsah popelovin,  $S$ -obsah síry) bylo dle katalogu paliv dodavatele uhlí dopočteno průměrné prvkové složení paliva. Dále byl proveden přepočet výhřevnosti udávané dodavatelem v katalogu paliv na průměrné hodnoty obsahu  $W$ ,  $A$ ,  $S$  a bylo konstatováno, že tato hodnota se shoduje s průměrnou výhřevností stanovenou v laboratoři.

Dále byla porovnána deklarovaná spotřeba paliva (uhlí) s parním výkonem kotle. Množství spotřebovaného paliva bylo pomocí výhřevnosti přepočteno na chemické teplo obsažené v palivu a tato energie byla následně porovnána s energií páry vyrobenou v kotli K12 (262 MW při výkonu 350 t/h) – jedná se tedy o přímou metodu výpočtu účinnosti kotle (viz. následující tabulka). [9, 10, 14]

Tab. 5.4 Přímé porovnání energie paliva ku energii v páře

	Výkon kotle K12	Výkon kotle K12	Spotřeba uhlí K12	Výhřevnost Qir	Energie v palivu	Energie v páře	Účinnost kotle
	t/h	MW	t	MJ/kg	GJ/den	GJ/den	%
13. 5.	228	170	1 420	11,31	16 060	14 720	91,7%
14. 5.	283	212	1 710	11,45	19 580	18 285	93,4%
15. 5.	311	233	1 560	11,36	17 722	20 121	113,5%
16. 5.	304	228	1 390	11,86	16 485	19 679	119,4%
17. 5.	303	227	1 470	11,83	17 390	19 589	112,6%
18. 5.	298	223	1 340	11,92	15 973	19 297	120,8%
19. 5.	300	225	1 610	11,58	18 644	19 412	104,1%
20. 5.	304	227	1 500	11,57	17 355	19 634	113,1%
21. 5.	298	223	1 640	11,82	19 385	19 270	99,4%
22. 5.	296	221	1 540	11,33	17 448	19 130	109,6%
23. 5.	301	225	1 260	11,34	14 288	19 448	136,1%
24. 5.	228	171	1 430	11,09	15 859	14 770	93,1%
25. 5.	227	170	1 300	11,82	15 366	14 654	95,4%
26. 5.	281	210	1 400	11,32	15 848	18 176	114,7%
Průměr	283	212	20 570	11,54	237 403	256 187	107,9%

Jak je patrné z této tabulky činí průměrná účinnost kotle FK12 vypočtená z předaných dat z období zkoušek cca 108 %, což je ovšem o cca 16 % více než je očekávaná hodnota. Dá se

tedy předpokládat, že buď bylo ve skutečnosti spáleno více paliva, než bylo během zkoušek vykázáno, nebo nejsou hodnoty měření množství vyrobené páry přesné.

Vzhledem k tomu, že množství spáleného paliva má přímý vliv na množství síry, které vstupuje do kotle a tedy i na poměr Ca/S, bylo postupováno i opačně a množství spáleného paliva bylo spočteno i z množství vyrobené páry. Při výpočtu bylo uvažováno s průměrnou účinností kotle 91,5%.

Pozn.: Ca/S je množstevní poměr vápence a síry vstupujícího do kotle. *Ca* je čistý vápník obsažený v celkovém množství veškerého vstupujícího vápence a *S* je celkové množství síry obsažené ve vstupujícím palivu. Poměr je vždy vztažen na 1 mol síry k určitému množství vápníku.

Naopak množství paliva nemá vliv na účinnost odsíření kotle, nebo na předpokládanou hodnotu emisí kyslíčků síry 450 ng/Nm<sup>3</sup>. [9, 10, 11]

V následující tabulce je proveden přepočítání spotřeby paliva při účinnosti kotle 91,5 %.

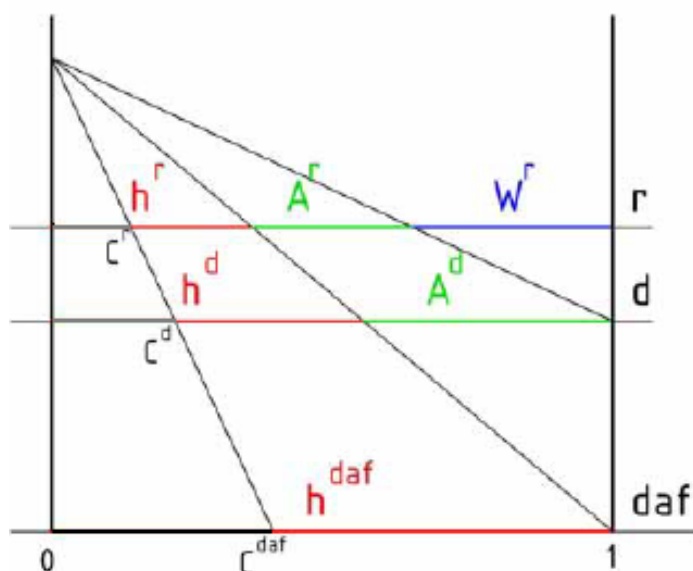
Tab. 5.5 Přepočítání spotřeby paliva při dané účinnosti kotle

	Výkon kotle K12	Výkon kotle K12	Spotřeba uhlí K12	Výhřevnost Q <sub>ir</sub>	Energie v palivu	Energie v páře	Účinnost kotle
	t/h	MW	t	MJ/kg	GJ/den	GJ/den	%
13. 5.	228	170	1 422	11,31	16 087	14 720	91,5%
14. 5.	283	212	1 745	11,45	19 983	18 285	91,5%
15. 5.	311	233	1 936	11,36	21 990	20 121	91,5%
16. 5.	304	228	1 813	11,86	21 507	19 679	91,5%
17. 5.	303	227	1 810	11,83	21 409	19 589	91,5%
18. 5.	298	223	1 769	11,92	21 089	19 297	91,5%
19. 5.	300	225	1 832	11,58	21 215	19 412	91,5%
20. 5.	304	227	1 855	11,57	21 458	19 634	91,5%
21. 5.	298	223	1 782	11,82	21 060	19 270	91,5%
22. 5.	296	221	1 845	11,33	20 907	19 130	91,5%
23. 5.	301	225	1 874	11,34	21 255	19 448	91,5%
24. 5.	228	171	1 456	11,09	16 143	14 770	91,5%
25. 5.	227	170	1 355	11,82	16 015	14 654	91,5%
26. 5.	281	210	1 755	11,32	19 865	18 176	91,5%
Celkem	283	212	24 249	11,54	279 985	256 187	91,5%

Na základě složení paliva byl proveden stechiometrický výpočet, dle kterého je potřeba spaliny odsířit na 92,1 %, (tj. zbavit spaliny 92,1 % oxidů síry) aby bylo dosaženo hodnot emisí oxidů síry 450 mg/Nm<sup>3</sup>. [10, 13, 14, 15, 17]

Pro výpočet stechiometrie je třeba znát prvkové složení paliva. Tuhá paliva mohou být definována při různých stavech (původní  $r$ , analytický  $a$ , bezvodý  $d$ , bez vody a popela  $daf$ , organický  $o$ ). Na Obr. 5.2 je naznačeno, že při zadání paliva se nejčastěji používají tři stavy, a to:

- $r$  (real) – původní (někdy surový) stav (hořlavina  $h$  + popelovina  $A$  + voda  $W$ )
- $d$  (dry) – bezvodý stav (hořlavina  $h$  + popelovina  $A$ )
- $daf$  (dry ashfree) – stav bez vody a popela (jen hořlavina  $h$ )



Obr. 5.2 Přepočet mezi stavy [13]

Jelikož se do stechiometrických výpočtů dosazují složky paliva ve stavu  $r$ , je nutné je na tento stav přepočítat dle následujících vzorových rovnic:

$$A^r = A^d \cdot \frac{100 - W^r}{100} \quad [\%] \quad (5.1)$$

$$C^r = C^{daf} \cdot \frac{100 - A^r - W^r}{100} \quad [\%] \quad (5.2)$$

$$C^r = C^a \cdot \frac{100 - W^r}{100 - W^a} \quad [\%] \quad (5.3)$$

Elementární složky jsou dosazovány v hmotnostních procentech. Hmotnostní podíl spalitelné síry  $S_{spal}^r$  [%] tvoří součet síry organické a pyritické. Síra vázaná v síranech při spalování neoxiduje, a proto se do výpočtu stechiometrie nezahrnuje (je součástí  $A'$ ). Přepočtené složení jednoduše zkontrolujeme, neboť musí platit:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_{spal}^r + A^r + W^r = 100 \quad (5.4)$$

Ve výpočtu bylo počítáno se spalitelností síry v palivu 98 % (tzn. obsah pyritické a organické síry). Dále je počítáno s čistotou jemného vápence 98 % a čistotou hrubozrnného vápence 93 %. [13]

Na základě uvedených hodnot byl proveden výpočet poměrů Ca/S a to jak pro množství paliva, které bylo vykázáno, že bylo spáleno při zkouškách tak pro množství paliva, které bylo vypočteno z výroby páry pro účinnost kotle 91,5 %. Deklarované množství dávkovaného vápence nebylo nijak upravováno.

Stupeň odsíření spalin, čistota vápence (jak jemnozrnného tak hrubozrnného) je při obou výpočtech uvažována stejně.

Při výpočtu jsou používány obsahy síry, které uvádí jak dodavatel paliva, tak získané z rozborů paliva v ETI.

Dá se tedy konstatovat, že v uvedené kombinaci jsou vypočteny čtyři poměry Ca/S.

Výsledky výpočtů jsou uváděny v následujících tabulkách.



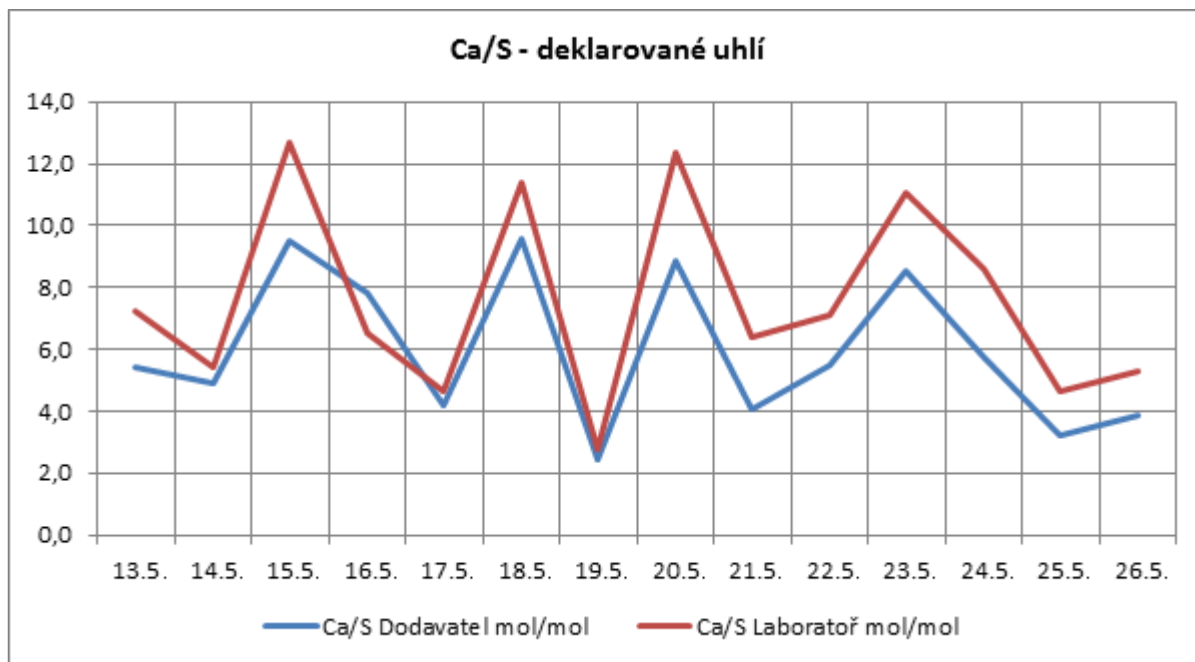
Tab. 5.6 Vypočtené poměry Ca/S (deklarovaná spotřeba uhlí)

Deklar. uhlí	Spotřeba uhlí K12 Vykázáno	S <sup>r</sup> Dodavatel	S <sup>r</sup> Laboratoř	Ca Standard	Kusový	Ca Celkem	Ca/S Dodavatel	Ca/S Laboratoř
	t	t	t	t	t	t	mol/mol	mol/mol
13. 5.	1420	17,8	13,4	25,3	86,5	111,8	5,5	7,3
14. 5.	1710	21,5	19,4	58,8	62,5	121,3	4,9	5,4
15. 5.	1560	19,1	14,3	99,4	109,4	208,8	9,5	12,7
16. 5.	1390	17,2	20,6	59,3	94,8	154,1	7,8	6,5
17. 5.	1470	17,6	15,9	36,2	48,4	84,6	4,2	4,6
18. 5.	1340	16,3	13,7	75,9	104,2	180,0	9,6	11,4
19. 5.	1610	18,5	16,6	12,3	40,0	52,2	2,5	2,7
20. 5.	1500	18,1	12,9	107,8	76,6	184,4	8,9	12,4
21. 5.	1640	19,6	12,4	34,5	56,7	91,2	4,0	6,4
22. 5.	1540	19,0	14,6	30,1	90,1	120,2	5,5	7,1
23. 5.	1260	15,6	12,0	72,3	80,6	152,9	8,5	11,1
24. 5.	1430	17,1	11,4	38,8	74,4	113,2	5,8	8,6
25. 5.	1300	16,2	11,2	25,9	33,5	59,4	3,2	4,6
26. 5.	1400	17,3	12,5	54,8	21,9	76,8	3,9	5,3
Celkem	20 570	251	201	731	980	1 711	5,9	7,4

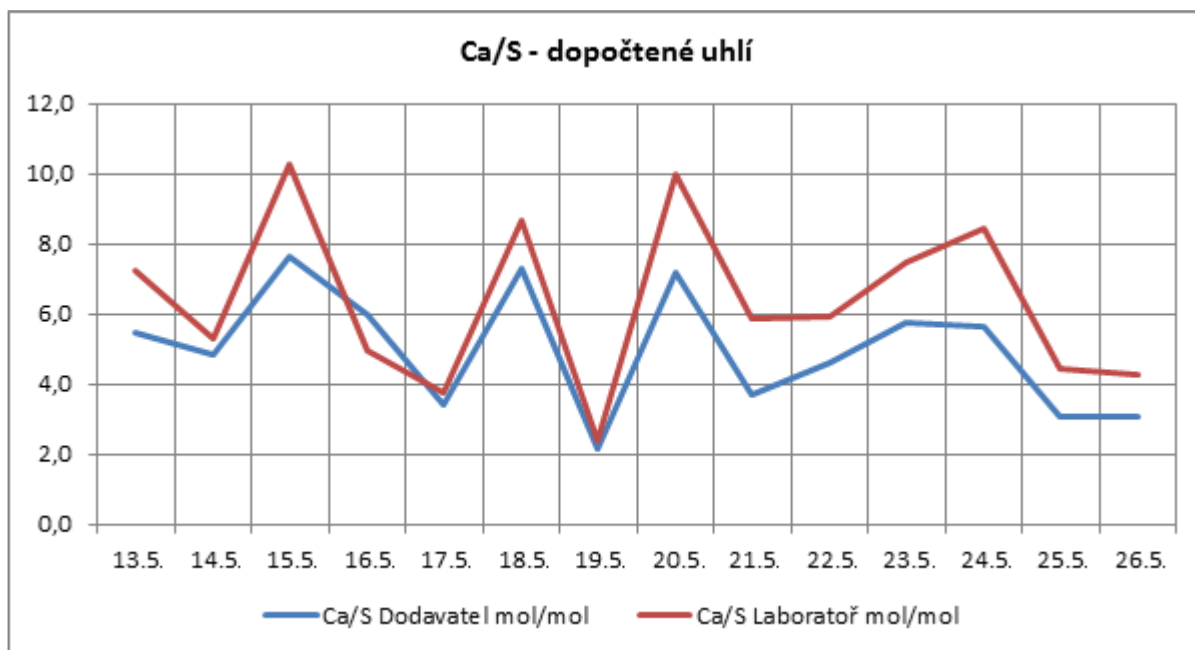
Tab. 5.7 Vypočtené poměry Ca/S (vypočtená spotřeba uhlí)

Vypočt. uhlí	Spotřeba uhlí K12 výpočet	S <sup>r</sup> Dodavatel	S <sup>r</sup> Laboratoř	Ca Standard	Kusový	Ca Celkem	Ca/S Dodavatel	Ca/S Laboratoř
	t	t	t	t	t	t	mol/mol	mol/mol
13. 5.	1 422	17,8	13,4	25,3	86,5	111,8	5,4	7,3
14. 5.	1 745	21,9	19,8	58,8	62,5	121,3	4,8	5,3
15. 5.	1 936	23,7	17,7	99,4	109,4	208,8	7,7	10,2
16. 5.	1 813	22,4	26,9	59,3	94,8	154,1	6,0	5,0
17. 5.	1 810	21,6	19,6	36,2	48,4	84,6	3,4	3,7
18. 5.	1 769	21,5	18,1	75,9	104,2	180,0	7,3	8,6
19. 5.	1 832	21,0	18,9	12,3	40,0	52,2	2,2	2,4
20. 5.	1 855	22,4	16,0	107,8	76,6	184,4	7,2	10,0
21. 5.	1 782	21,3	13,5	34,5	56,7	91,2	3,7	5,9
22. 5.	1 845	22,8	17,5	30,1	90,1	120,2	4,6	6,0
23. 5.	1 874	23,1	17,8	72,3	80,6	152,9	5,7	7,5
24. 5.	1 456	17,4	11,6	38,8	74,4	113,2	5,7	8,4
25. 5.	1 355	16,9	11,6	25,9	33,5	59,4	3,1	4,4
26. 5.	1 755	21,7	15,7	54,8	21,9	76,8	3,1	4,2
Celkem	24 249	296	238	731	980	1 711	5,0	6,2

Jak je patrné z těchto tabulek činí rozptyl průměrných hodnot Ca/S při zkouškách s hrubozrnným vápencem 4,3-6,3 (mol/mol). Vypočtené hodnoty byly vyneseny do grafů.



Obr. 5.3 Porovnání laboratorních výsledků ve výpočtech od dodavatele a laboratoře ETI (deklarovaná spotřeba)



Obr. 5.4 Porovnání laboratorních výsledků ve výpočtech od dodavatele a laboratoře ETI (dopočtená spotřeba)

Jak je patrné z obou grafů, vypadají veškeré křivky přibližně stejně, liší se především v absolutních hodnotách Ca/S. Dále je možno konstatovat, že Ca/S vycházející z obsahů síry dle dodavatele uhlí jsou nižší než v případě hodnot dle rozborů v laboratořích ETI. Při použití hodnot obsahu síry dle dodavatele je také menší rozptyl mezi hodnotami Ca/S získanými ze spotřeby vykázaného uhlí a uhlí dopočteného (rozdíl cca 0,7). [8, 9, 12, 15]

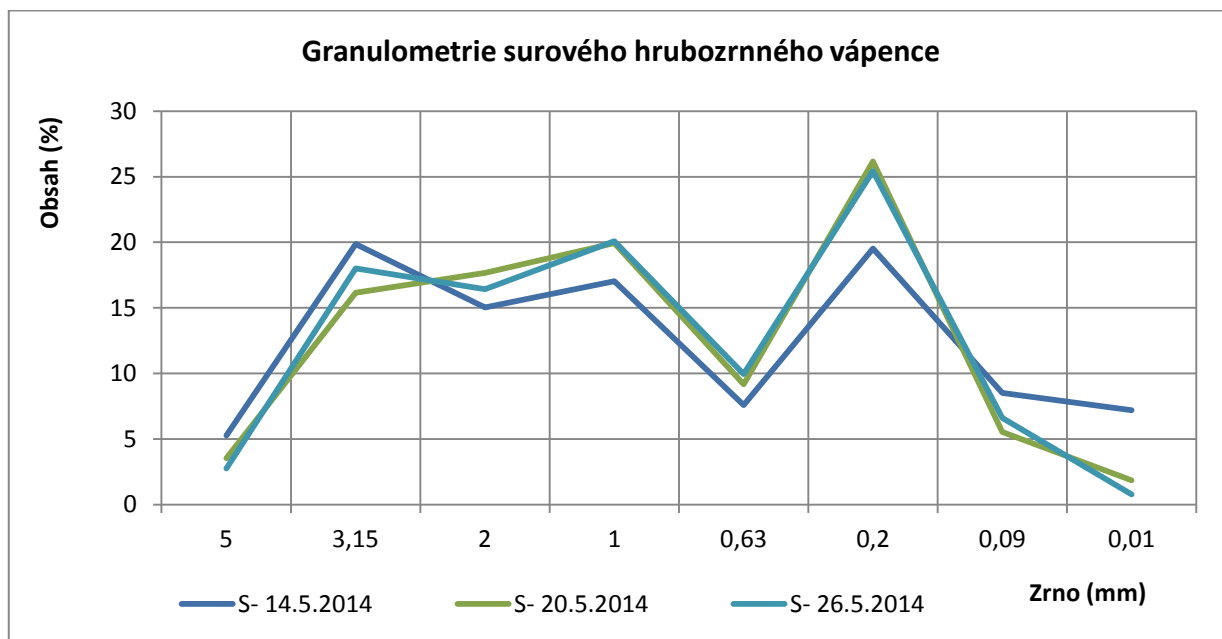
Hlavním úkolem zkoušek bylo určit, do jaké míry se zapojuje hrubozrnný vápenec do odsířovacího procesu kotle. Zrnitost hrubozrnného vápence není přesně definována, proto byly během zkoušek 3x odebrány vzorky a byla provedena granulometrie.

Dále byl odebraný vzorek podroben žihání, aby bylo simulováno prostředí ve spalovací komoře. Žihání se provádělo po dobu 20 min při teplotě 850°C a granulometrie byla opakována. V tomto případě je nutno upozornit, že vzhledem k rozdílným podmínkám ve spalovací komoře a při žihání v píce se jedná o zkoušku pouze orientační. Výsledky provedených granulometrií jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.8 Orientační výsledky provedených granulometrií

		Surový	Žiháný	Surový	Žiháný	Surový	Žiháný
datum odběru		14.5.2014	14.5.2014	20.5.2014	20.5.2014		26.5.2014
vlhkost	%	2,5		2,21		2,65	
čistota obsah CaCO <sub>3</sub>	%	93,55		93,19		93,14	
sypná hmotnost	kg/m <sup>3</sup>	1250		1394		1324	
granulometrie							
5 mm	%	5,26	4,43	3,53	3,37	2,74	2,30
3,15 mm	%	19,86	20,49	16,16	17,93	18,01	14,94
2 mm	%	15,03	17,07	17,67	18,08	16,42	16,26
1 mm	%	17,04	16,49	19,93	18,91	20,08	19,48
0,63 mm	%	7,58	7,70	9,16	8,29	9,95	9,59
0,2 mm	%	19,51	15,50	26,17	15,36	25,43	18,99
0,09 mm	%	8,52	8,67	5,53	8,42	6,60	11,35
propad	%	7,20	9,65	1,85	9,65	0,77	7,09

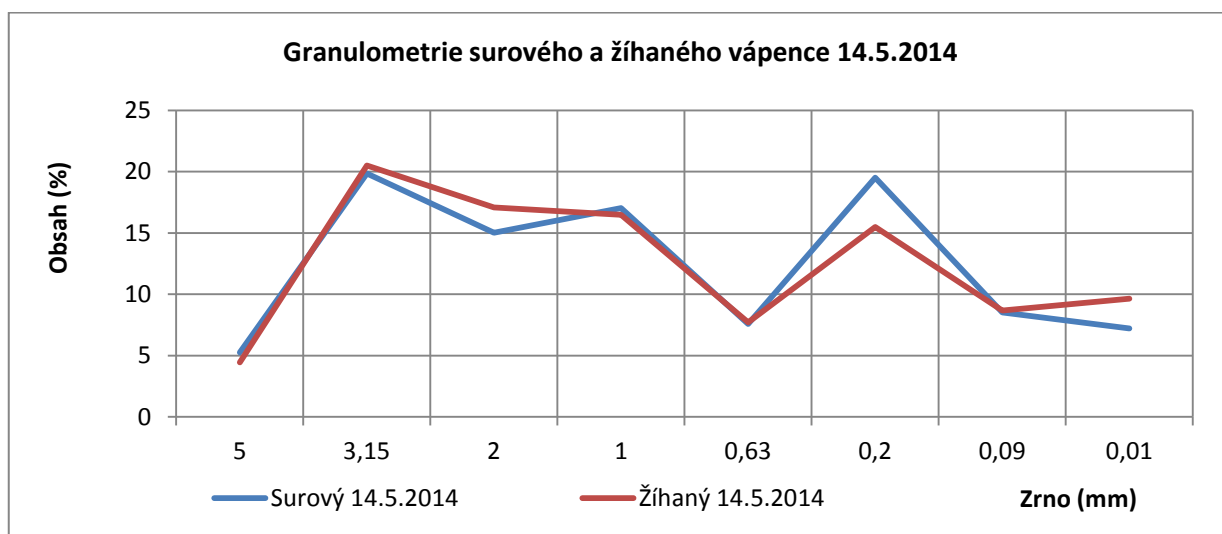
Granulometrie odebraných vzorků surového vápence byla zakreslena do následujícího grafu.



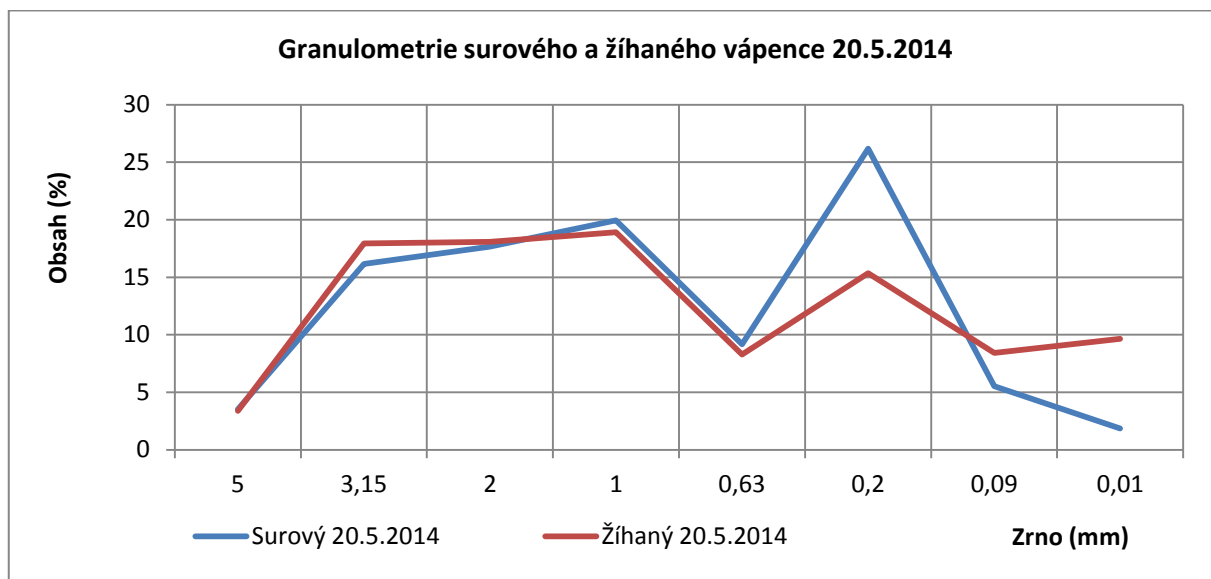
Obr. 5.5 Porovnání odebraných vzorků granulometrie surového vápence

Jak je patrné z tohoto grafu, granulometrie všech odebraných vzorků hrubozrnného vápence se od sebe příliš neliší a dá se konstatovat, že v zásadě jsou přibližně stejné.

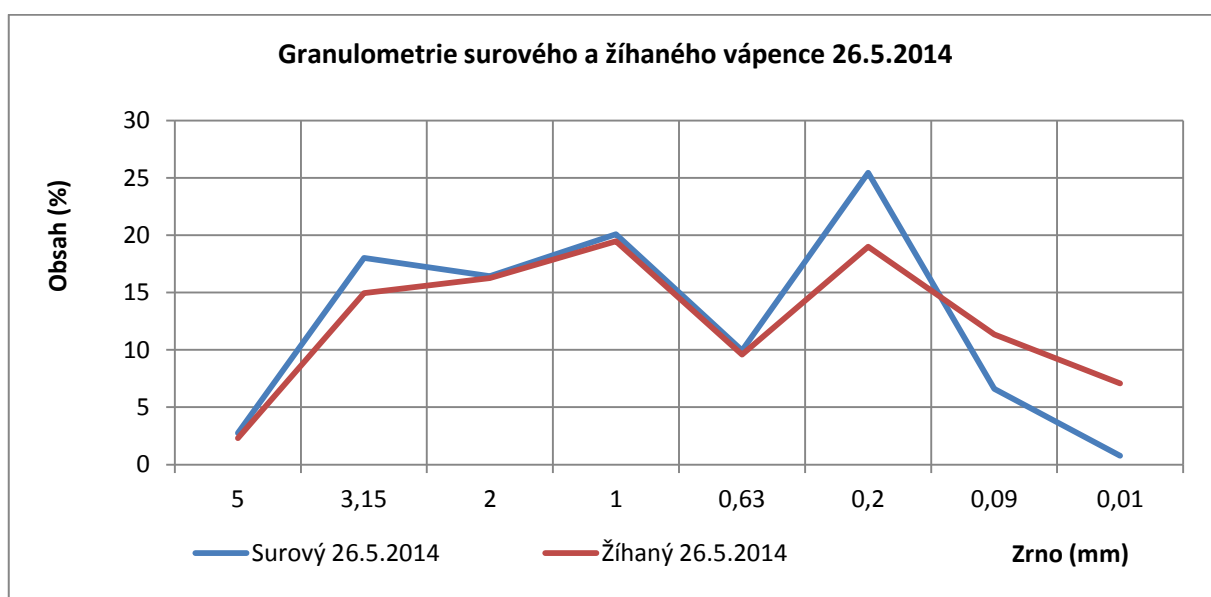
Dále byly navzájem porovnány křivky granulometrie vápence před a po žihání. Výsledky porovnání jednotlivých vzorků jsou uvedeny v následujících grafech.



Obr. 5.6 Porovnání surového a žíhaného vápence



Obr. 5.7 Porovnání surového a žíhaného vápence



Obr. 5.8 Porovnání surového a žíhaného vápence

Jak je patrné z těchto grafů, rozdíly v granulometrii surového a žíhaného vápence se v oblasti 5-0,63 mm prakticky nemění. Pod touto oblastí je patrný posun k jemnějšímu zrnění.

Skutečnost, že hrubé frakce vápence při žíhání nezměnily svou granulometrii (tzn. nezměnily svůj měrný povrch) nás může vést k domněnce, že se tyto částice zúčastňují odsířovacího procesu pouze sporadicky. [8, 10, 15]

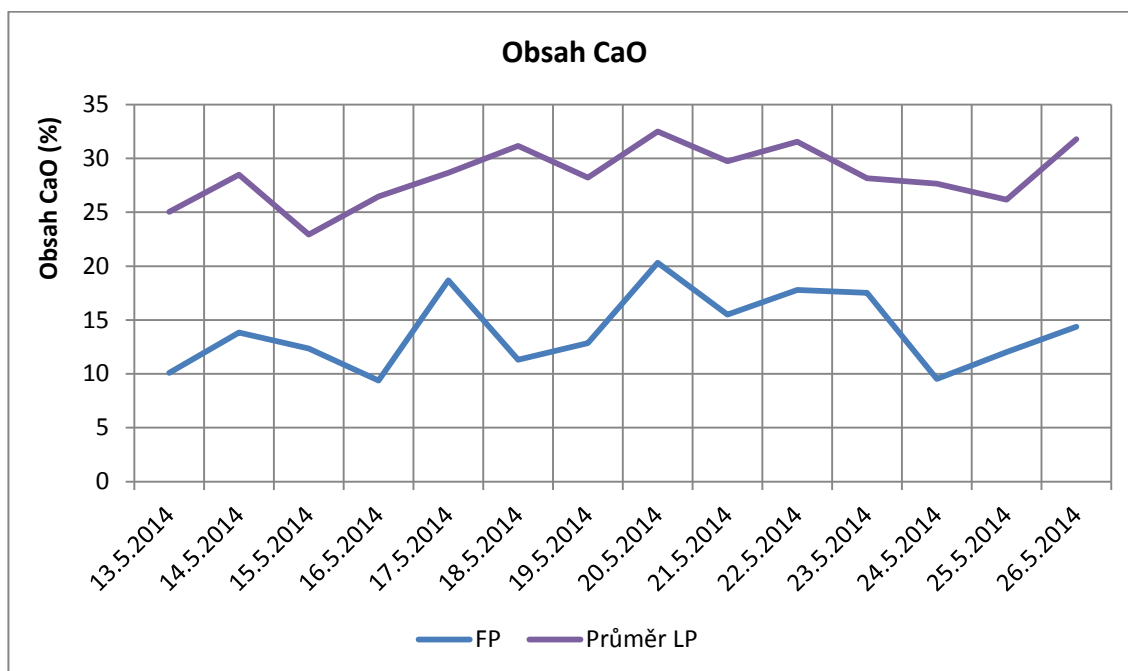
Dále byly během celých zkoušek prováděny odběry ložového popela a popílku a v těchto tuhých zbytcích spalovacího procesu byly prováděny rozborů na obsah nezkalcinovaného vápence ( $\text{CaCO}_3$ ), na obsah nezreagovaného  $\text{CaO}$  a na obsah výsledného produktu odsířovacího procesu  $\text{CaSO}_4$ .

V další tabulce jsou zaznamenány obsahy volného nezreagovaného  $\text{CaO}$  v úletovém popílku a v ložovém popelu. Zde je ještě potřeba zdůraznit, že po celou dobu zkoušek bylo používáno palivo o přibližně stejných vlastnostech – v tomto případě se jedná především o měrnou sírnatost a měrnou popelnatost (g/MJ). Průměrná měrná popelnatost paliva během zkoušek byla 17,7g/MJ, průměrná odchylka měrné popelnatosti činila 1,1 g/MJ, což je cca 6 % průměrné hodnoty. Průměrná měrná sírnatost paliva činila 1,1 g/MJ, průměrná odchylka 0,03 g/MJ, což jsou cca 3 %.

Tab. 5.9 Obsah nezreagovaného vápence v úletovém a ložovém popelu

		volné $\text{CaO}$		
	FP	LP ETG 81	LP ETG 86	Průměr LP
	%	%	%	%
13.5. 2014	10,10	25,46	24,64	25,05
14.5. 2014	13,83	29,48	27,46	28,47
15.5. 2014	12,35	23,62	22,21	22,92
16.5. 2014	9,39	25,66	27,29	26,48
17.5. 2014	18,69	27,02	30,31	28,67
18.5. 2014	11,31	29,01	33,33	31,17
19.5. 2014	12,86	27,70	28,75	28,23
20.5. 2014	20,32	31,72	33,27	32,50
21.5. 2014	15,50	29,87	29,58	29,73
22.5. 2014	17,79	31,98	31,12	31,55
23.5. 2014	17,53	27,80	28,52	28,16
24.5. 2014	9,52	28,70	26,61	27,66
25.5. 2014	12,03	26,58	25,76	26,17
26.5. 2014	14,36	31,64	31,90	31,77
Průměr	13,97	28,30	28,63	28,46

Jak je patrné z této tabulky, jsou obsahy volného  $\text{CaO}$  po celou dobu zkoušek stabilní (a to i při srovnání obou linek odtahu ložového popela), hodnoty analýz nevykazují velký rozptyl (viz následující graf).



Obr. 5.9 Porovnání volného CaO ve filtrovém a ložovém popelu

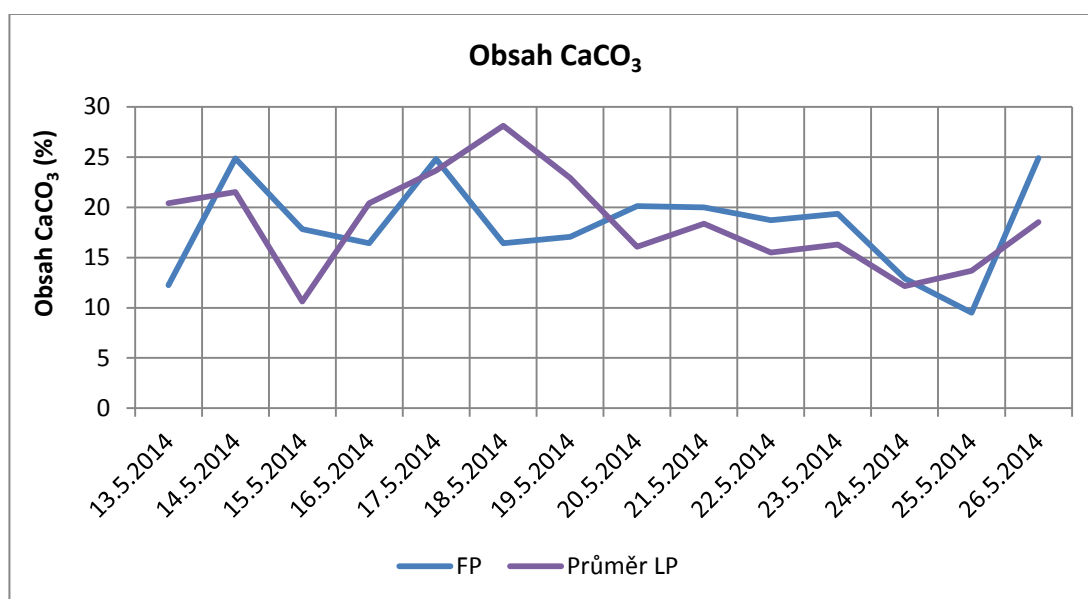
Jak je patrné z tohoto grafu, obsah volného CaO v popílku je podstatně menší než obsah CaO v ložovém popelu. [8, 9, 10, 15]

V další tabulce a grafu je uveden obsah nezkalcinovaného vápence v popelu a popílku. Rovněž v tomto případě jsou hodnoty analýz poměrně stabilní a rozdíly mezi hodnotami  $\text{CaCO}_3$  v obou linkách odtahu ložového popela nejsou velké.

Tab. 5.10 Obsah nezkalcinovaného vápence v úletovém a ložovém popelu

	CaCO <sub>3</sub>			
	FP	LP ETG 81	LP ETG 86	Průměr LP
	%	%	%	%
13.5. 2014	12,25	18,13	22,64	20,39
14.5. 2014	24,87	30,12	12,91	21,52
15.5. 2014	17,83	10,32	10,94	10,63
16.5. 2014	16,41	21,43	19,36	20,40
17.5. 2014	24,79	24,79	22,50	23,65
18.5. 2014	16,43	27,06	29,13	28,10
19.5. 2014	17,06	21,03	24,83	22,93
20.5. 2014	20,12	17,10	15,03	16,07
21.5. 2014	19,98	19,33	17,37	18,35
22.5. 2014	18,70	17,16	13,86	15,51
23.5. 2014	19,34	15,64	16,94	16,29
24.5. 2014	12,92	11,19	13,12	12,16
25.5. 2014	9,52	14,99	12,39	13,69
26.5. 2014	24,88	21,63	15,43	18,53
Průměr	18,22	19,28	17,60	18,44

Tento graf porovnává hodnoty nezkalcinovaného vápence v ložovém a filtrovém popelu.



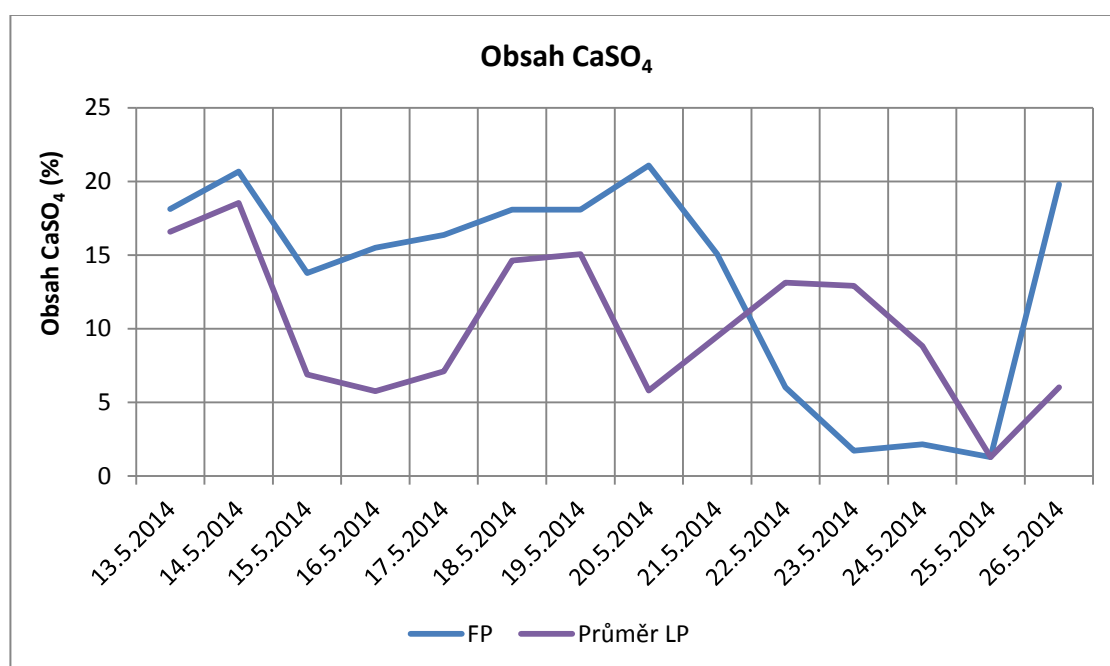
Obr. 5.10 Porovnání nezkalcinovaného vápence ve filtrovém a ložovém popelu



V této tabulce jsou hodnoty analýz popílku a ložového popela na produkt odsířovací reakce  $\text{CaSO}_4$ .

Tab. 5.11 Obsah produktu  $\text{CaSO}_4$  po odsířovací reakci v úletovém a ložovém popelu

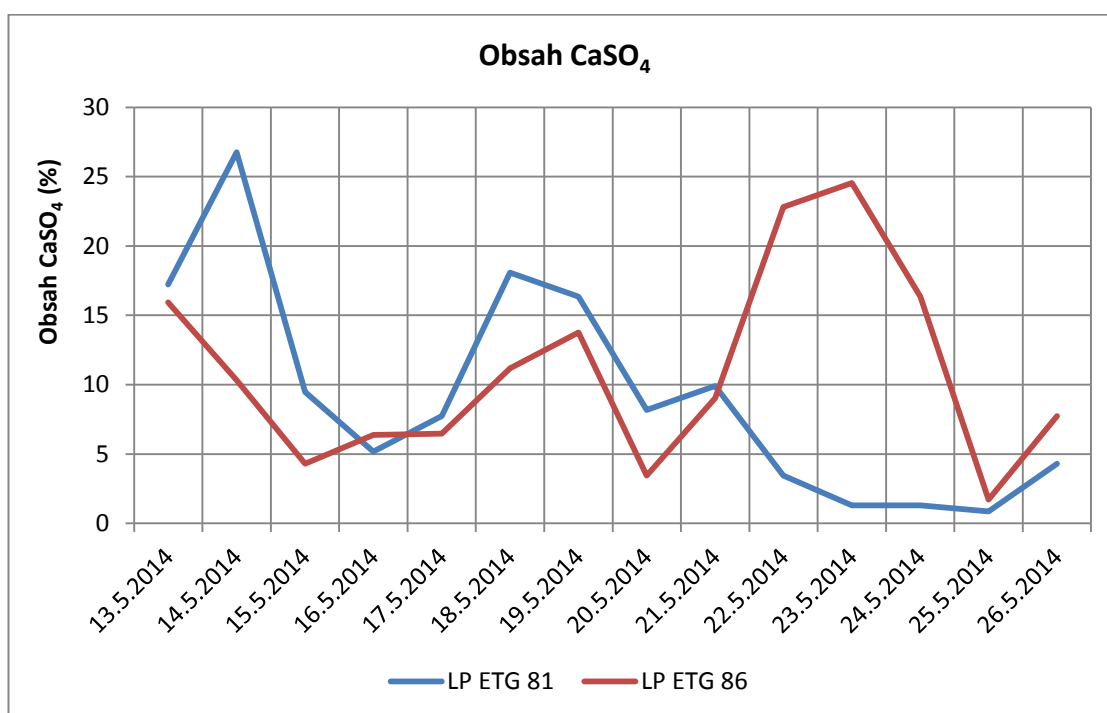
	$\text{CaSO}_4$			
	FP	LP ETG 81	LP ETG 86	Průměr LP
	%	%	%	%
13.5. 2014	18,13	17,22	15,93	16,58
14.5. 2014	20,66	26,76	10,33	18,55
15.5. 2014	13,77	9,47	4,30	6,89
16.5. 2014	15,50	5,17	6,37	5,77
17.5. 2014	16,36	7,75	6,46	7,11
18.5. 2014	18,08	18,08	11,19	14,64
19.5. 2014	18,08	16,36	13,77	15,07
20.5. 2014	21,09	8,18	3,44	5,81
21.5. 2014	15,06	9,90	9,04	9,47
22.5. 2014	6,03	3,44	22,81	13,13
23.5. 2014	1,72	1,29	24,54	12,92
24.5. 2014	2,15	1,29	16,36	8,83
25.5. 2014	1,29	0,86	1,72	1,29
26.5. 2014	19,79	4,30	7,75	6,03
Průměr	13,41	9,29	11,00	10,15



Obr. 5.11 Porovnání obsahu produktu  $\text{CaSO}_4$  po odsířovací reakci v úletovém a ložovém popelu

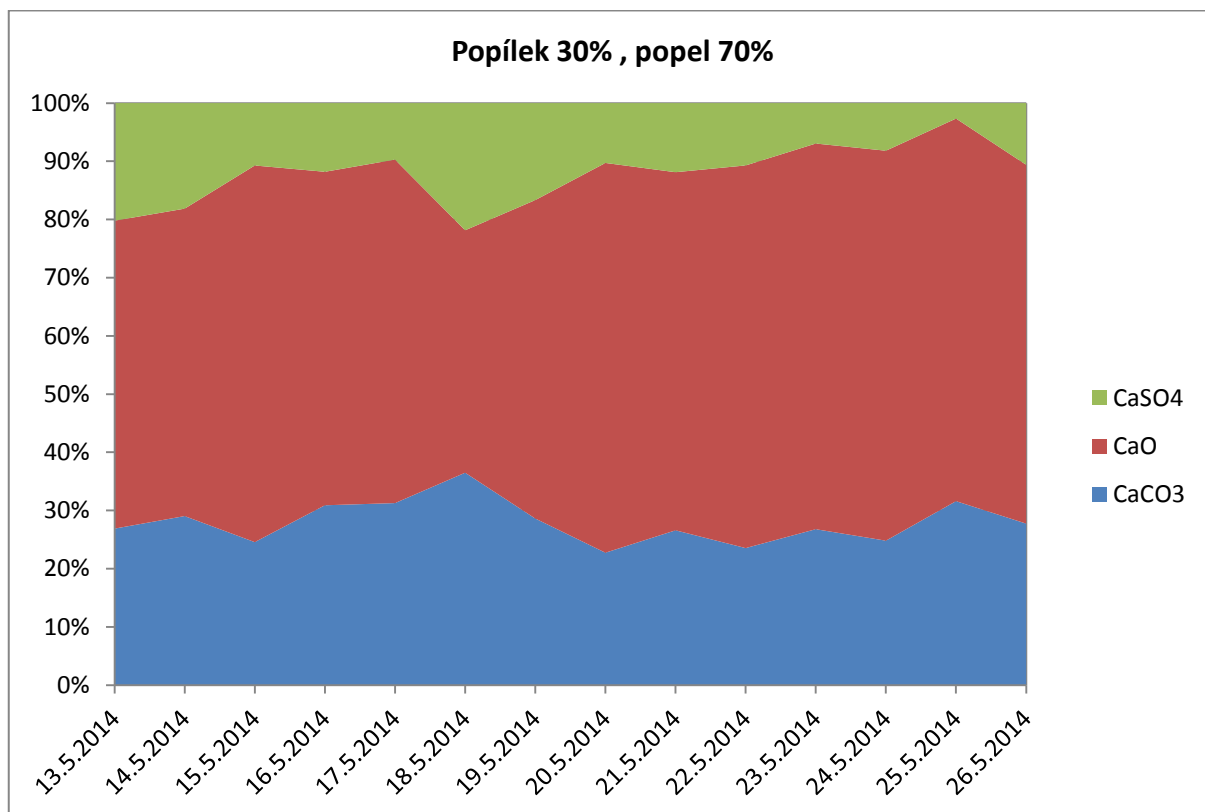
Jak je patrné z předchozí tabulky a následného grafu vykazuje v tomto případě popílek a ložový popel značný rozptyl hodnot. V případě popílku jsou hodnoty poměrně stabilní až do 20.-21. 5., kdy následuje strmý pád obsahu.

Situace s  $\text{CaSO}_4$  s ložovým popelem je ještě složitější. V následujícím grafu jsou zobrazeny hodnoty z obou dopravních linek (ETG 81, 86) ložového popela. Jak je patrné z těchto hodnot, dochází po 21. 5. k velkému rozdílu mezi jednotlivými trasami. Důvody těchto rozdílů nejsou známy (chyba v rozborech?). [8, 9, 10, 15, 16, 17]

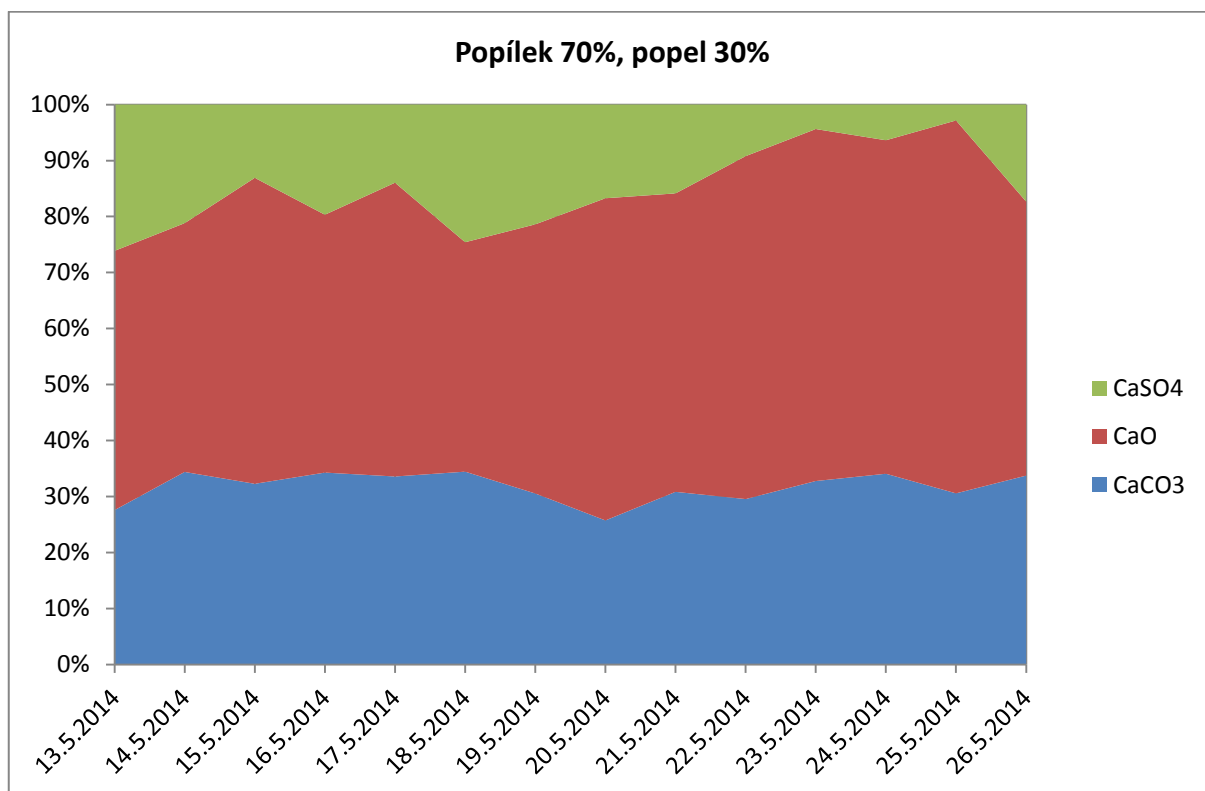


Obr. 5.12 Porovnání obou dopravních linek na obsah produktu  $\text{CaSO}_4$  v ložovém popelu

Vzhledem k tomu, že  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{CaSO}_4$  mají rozdílné molové hmotnosti byly veškeré tyto sloučeniny přepočteny na čistý vápník Ca v sloučeninách obsažený. Vzhledem k tomu tak můžeme ukázat využití vápence. Výraznou roli zde rovněž hraje rozdělení tuhých zbytků spalovacího procesu na popel a popílek. Vzhledem k tomuto byly provedeny dva předpokládané krajní výpočty tzn. pro 30 % popílku a pro 70 % popílku (popel dopočten do 100 %) a hodnoty byly vyneseny do následujících grafů.



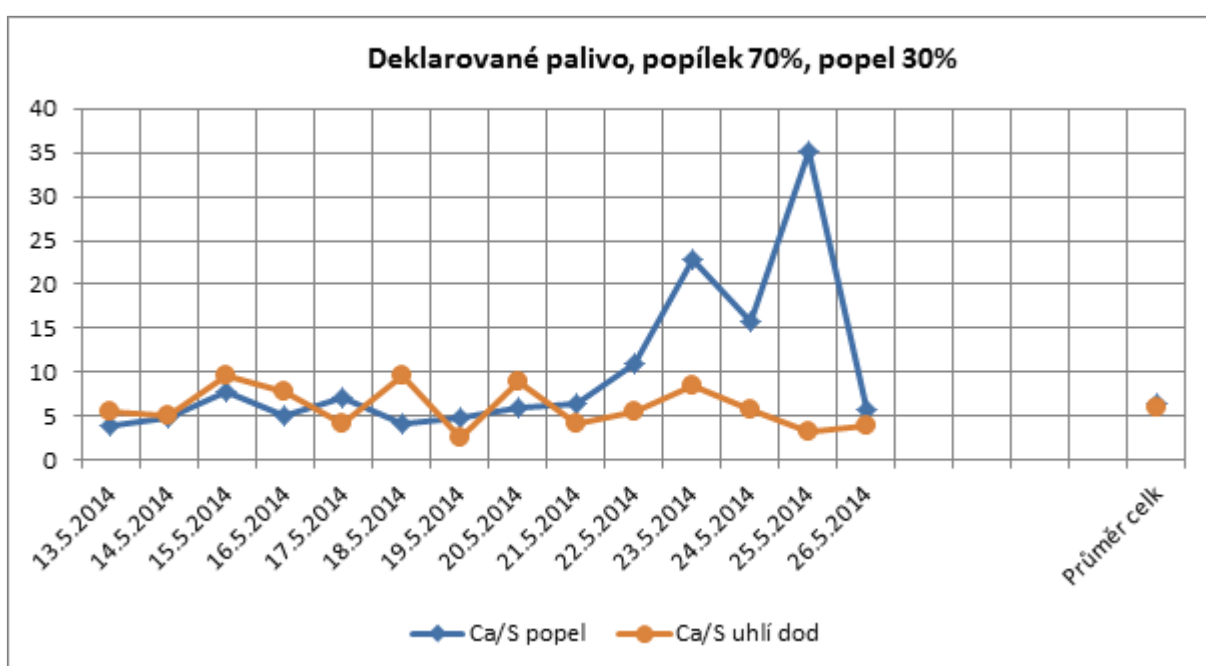
Obr. 5.13 Porovnání CaO, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> ve směsi úletového a ložového popela 30 % : 70 %



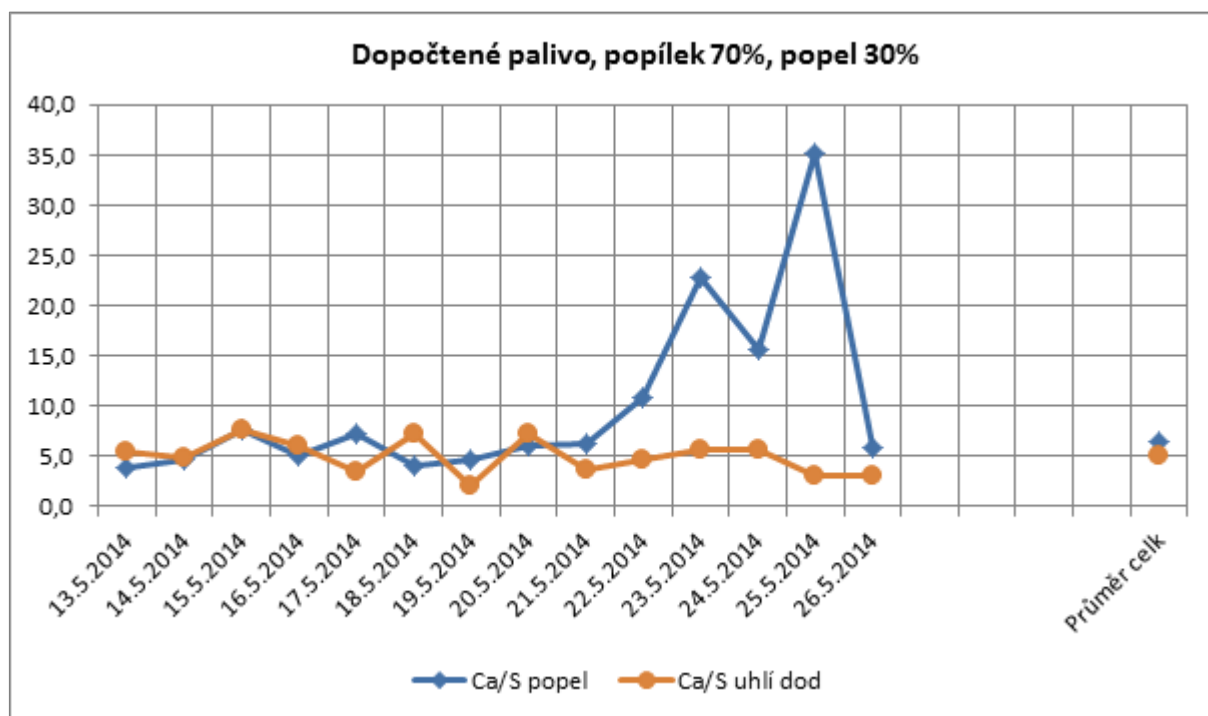
Obr. 5.14 Porovnání CaO, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> ve směsi úletového a ložového popela 70 % : 30 %

Jak je patrné z těchto grafů tvoří nezkalcinovaný vápenec v obou případech cca 30 % veškerého do kotle dodaného vápence po celou dobu zkoušek (rozdíly cca 3%). Na obou grafech je rovněž patrný pokles obsahu  $\text{CaSO}_4$  po 20. 5. [8, 9, 10, 15]

Z uvedených hodnot byl dále vypočten poměr Ca/S, který byl následně zkontrolován s Ca/S vypočteným z bilancí spotřeb uhlí a vápence. Při výpočtu je uvažováno se 70 % popílku, což vykazuje nejvyšší shodu s hodnotami získanými z bilancí.



Obr. 5.15 Vypočtené hodnoty Ca/S z odebraných vzorků popele a hodnoty Ca/S vypočtené z bilancí spotřeb palivo vápenec (deklarovaného paliva)



Obr. 5.16 Vypočtené hodnoty Ca/S z odebraných vzorků popele a hodnoty Ca/S vypočtené z bilancí spotřeb palivo vápenec (dopočteného paliva)

Jak je patrné z těchto grafů (Obr. 5.11-12) dochází ve dnech po 21. 5. ke značnému odchýlení hodnot. Dále je možno konstatovat, že hodnoty vycházející z paliva deklarovaného a paliva dopočteného se zásadně neliší, proto je dále již počítáno pouze s dopočteným palivem (tzn. účinnost kotle 91,5 %).

Z konstatování, že cca 30 % vápence nezkalcinuje se dále vycházelo při kontrole bilance obsahů produktů odsířování ze spotřeb paliva, vápence a obsahu síry v palivu.

Při tomto výpočtu se vychází z předpokladu že nezkalcinuje 30 % vápence, odsíření kotle na cca 450 mg/Nm<sup>3</sup> činí 92,1 % (ze stechiometrického výpočtu). Množství vzniklého CaSO<sub>4</sub> je vypočteno z množství vstupní a zachycené síry, množství volného CaO je následně dopočteno z množství vstupního a nezkalcinovaného vápence (rozdělení na popel a popílek v tomto případě není provedeno). [8, 9, 10, 12, 15]

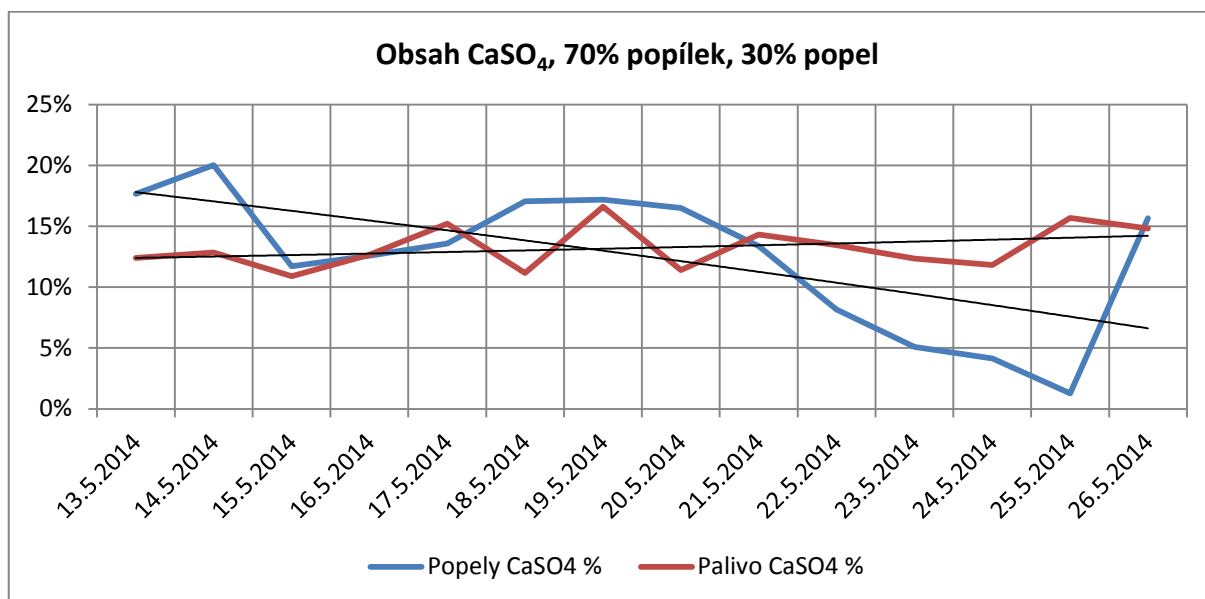
Množství popela je spočteno z popelnatosti paliva, nedopalu a výše uvedených produktů odsířovacího procesu. Výpočet je prováděn pro dopočtenou spotřebu paliva pro účinnost kotle 91,5 % (samostatně pro deklarovanou spotřebu paliva byl výpočet rovněž proveden, výsledky se zásadně neliší od hodnot uváděných).

Získané hodnoty byly následně porovnány s hodnotami získanými z rozborů popela pro poměr popílek : popel 30% : 70% a 70% : 30%.

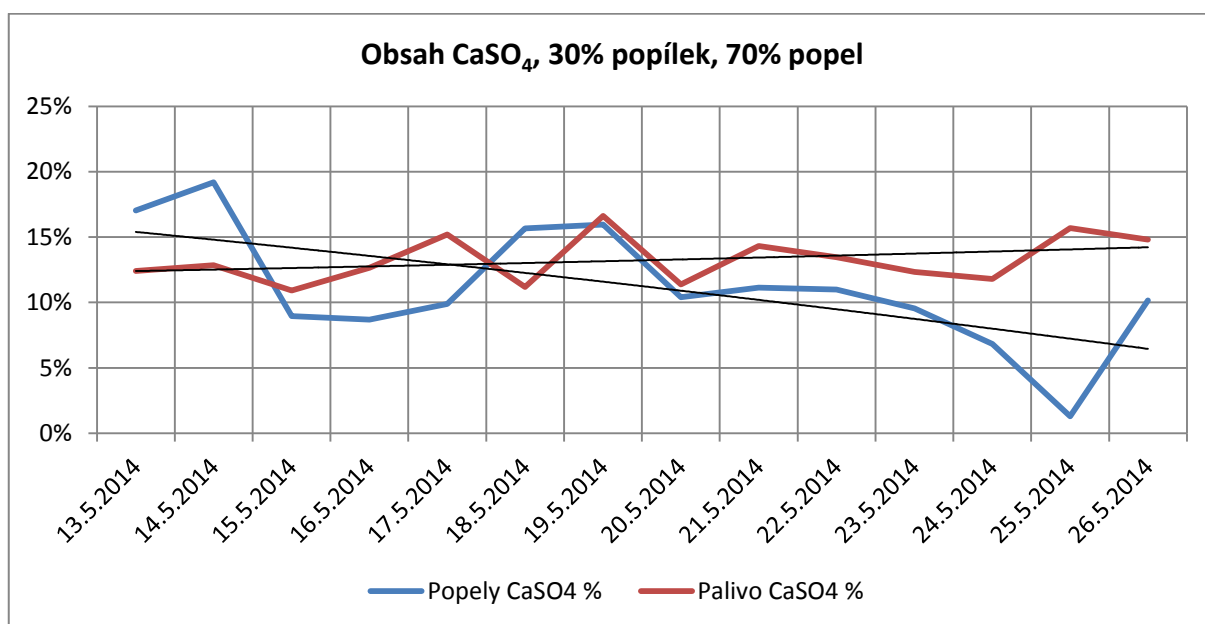
Tab. 5.12 Výsledky kontrolního výpočtu

Datum	Spotřeba uhlí	Popel	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaO
	t	t	%	%	%
13. 5.	1422	563,14	14,9%	12,4%	14,3%
14. 5.	1745	667,35	13,6%	12,8%	12,5%
15. 5.	1936	850,88	18,4%	10,9%	19,6%
16. 5.	1813	692,47	16,7%	12,7%	16,6%
17. 5.	1810	557,03	11,4%	15,2%	8,6%
18. 5.	1769	753,13	17,9%	11,2%	18,8%
19. 5.	1832	494,91	7,9%	16,6%	3,5%
20. 5.	1855	768,45	18,0%	11,4%	18,8%
21. 5.	1782	582,47	11,7%	14,3%	9,5%
22. 5.	1845	662,65	13,6%	13,5%	12,2%
23. 5.	1874	734,58	15,6%	12,3%	15,3%
24. 5.	1456	576,97	14,7%	11,8%	14,4%
25. 5.	1355	421,03	10,6%	15,7%	7,4%
26. 5.	1755	572,56	10,1%	14,8%	7,0%
Celkem	24 249	8 897,63	14,4%	13,0%	13,5%

Pokud získané hodnoty srovnáme s hodnotami získanými z rozborů popela, zjistíme, že zatímco v datech do 21. 5. hodnoty získané z rozborů popelů (popel a popílek) odpovídají zhruba hodnotám získaným z bilancí paliva, hodnoty po tomto datu se již značně odchylojí při jakémkoli uvažovaném rozdělení materiálu na popílek a popel.



Obr. 5.17 Porovnání hodnot kontrolního výpočtu a hodnot získaných z odebraných vzorků popela



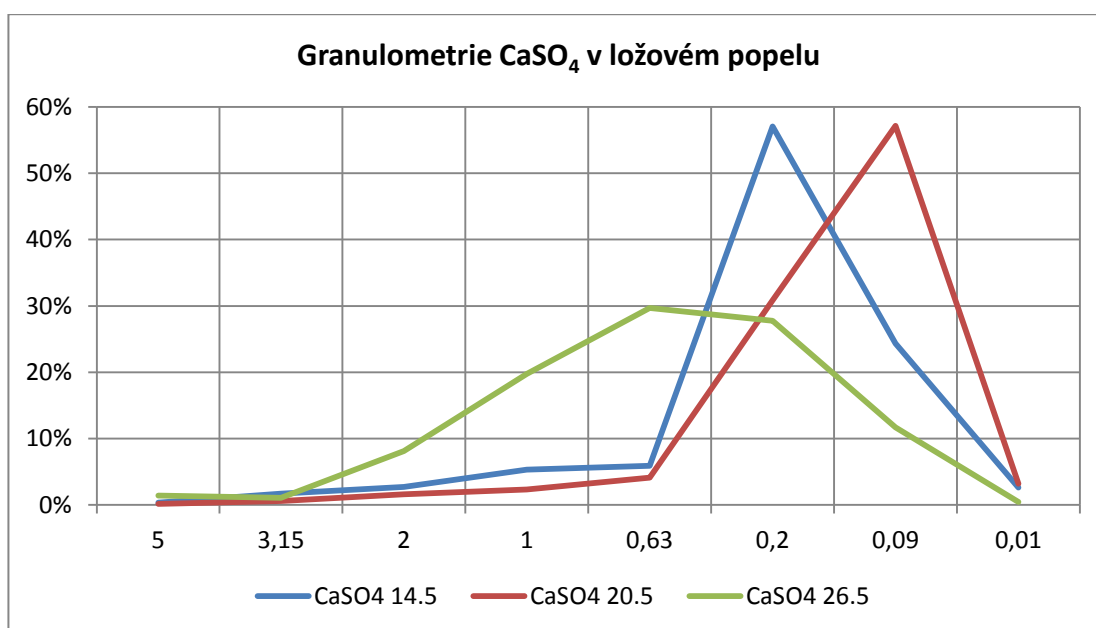
Obr. 5.18 Porovnání hodnot kontrolního výpočtu a hodnot získaných z odebraných vzorků popela

Vzhledem k tomuto je nutno považovat data po 21. 5. za málo průkazná. [8, 9, 10, 12, 15]

## 5.2.2 Výsledky zkoušek s hrubozrnným vápencem

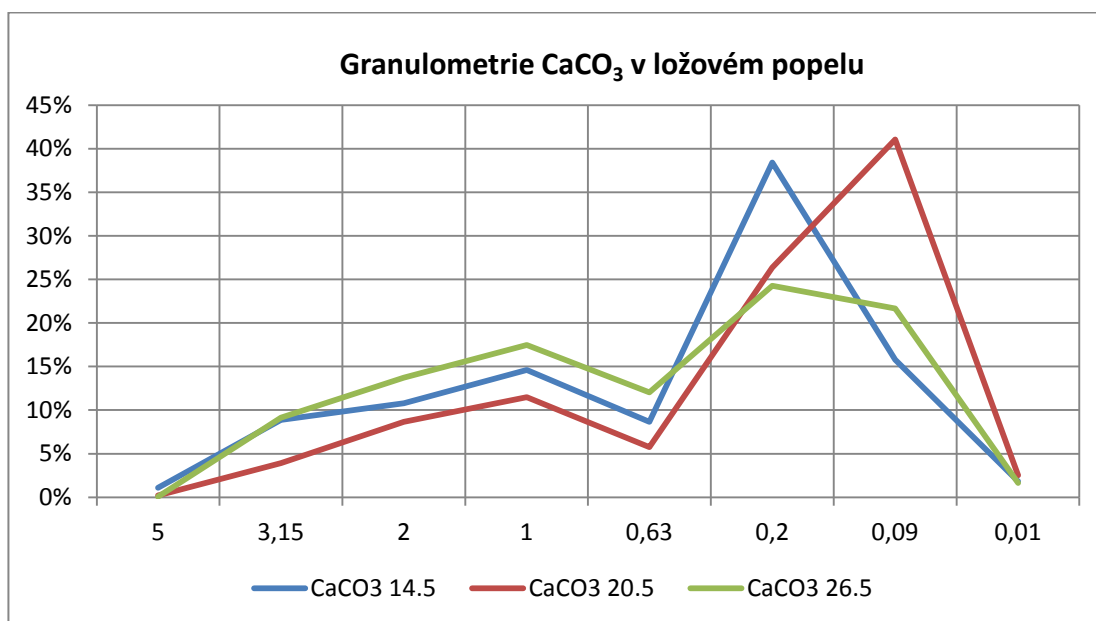
Na základě předchozích výsledků můžeme konstatovat, že cca 30 % vápence prochází kotlem, aniž by bylo zkalcinováno, cca 55 % vápence odchází v tuhých zbytcích ve formě CaO a jen cca 15 % se skutečně využije pro odsířovací reakci (tento poměr je nutno považovat jako průměrnou hodnotu během zkoušek, jsou závislé na výkonu kotle i množství hrubozrnného dávkovaného vápence a pravděpodobně i na konkrétní lince dávkování jemného vápence). Rozdělení tuhých zbytků není určeno, z výsledků se dá předpokládat, že většina tuhých zbytků bude ve formě popílku.

Jako poslední rozbor, které byly v rámci zkoušek prováděny, byly rozbor ložového popela z hlediska granulometrie a obsahu  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{CaSO}_4$ . Na následujících grafech je uvedeno procentuální složení - granulometrie  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{CaSO}_4$  v ložovém popelu.



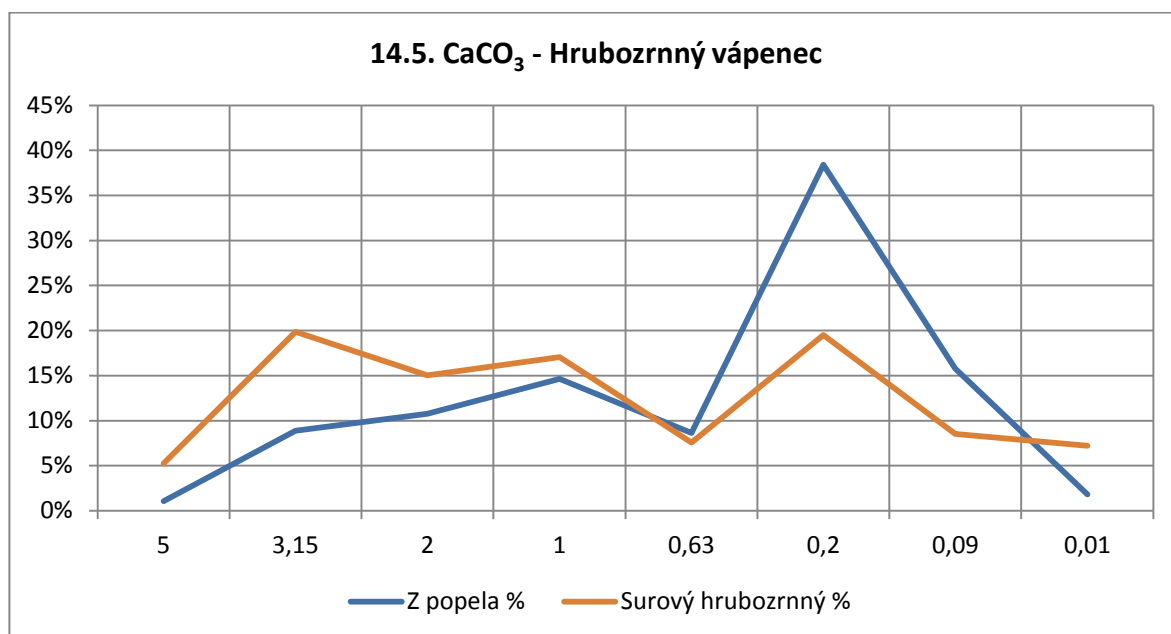
Obr. 5.19 Granulometrie  $\text{CaSO}_4$  v ložovém popelu v průběhu zkoušek



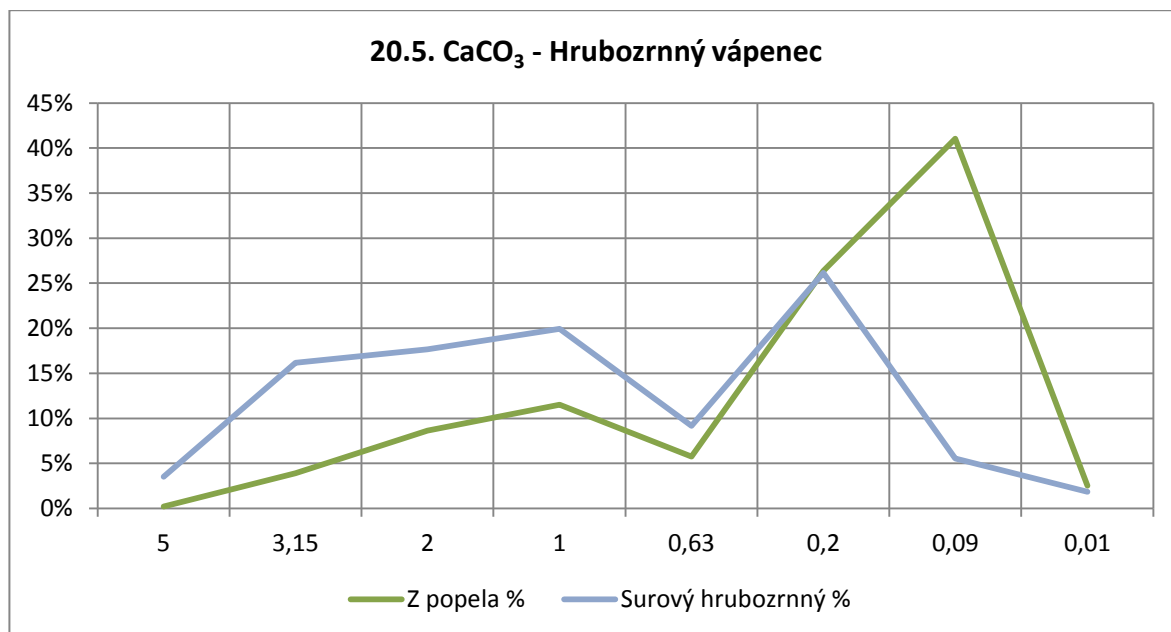
Obr. 5.20 Granulometrie CaSO<sub>3</sub> v ložovém popelu v průběhu zkoušek

Na těchto grafech opět vidíme, že data získaná po 21. 5. se odchyľují od dat předchozích a není možné s nimi dále uvažovat. Křivky granulometrií ze dne 14. 5. a 21. 5. jsou si velmi podobné, pouze se objevuje posun v oblasti jemné zrnitosti. Dále můžeme konstatovat, že CaSO<sub>4</sub> vzniká ve větší míře až pod velikostí zrna 0,63 mm, tudíž větší zrna vápence se odsířovací reakce účastní velice málo.

Křivky nezkalcinovaného vápence jsme srovnali s křivkou granulometrie dávkovaného hrubozrnného vápence.



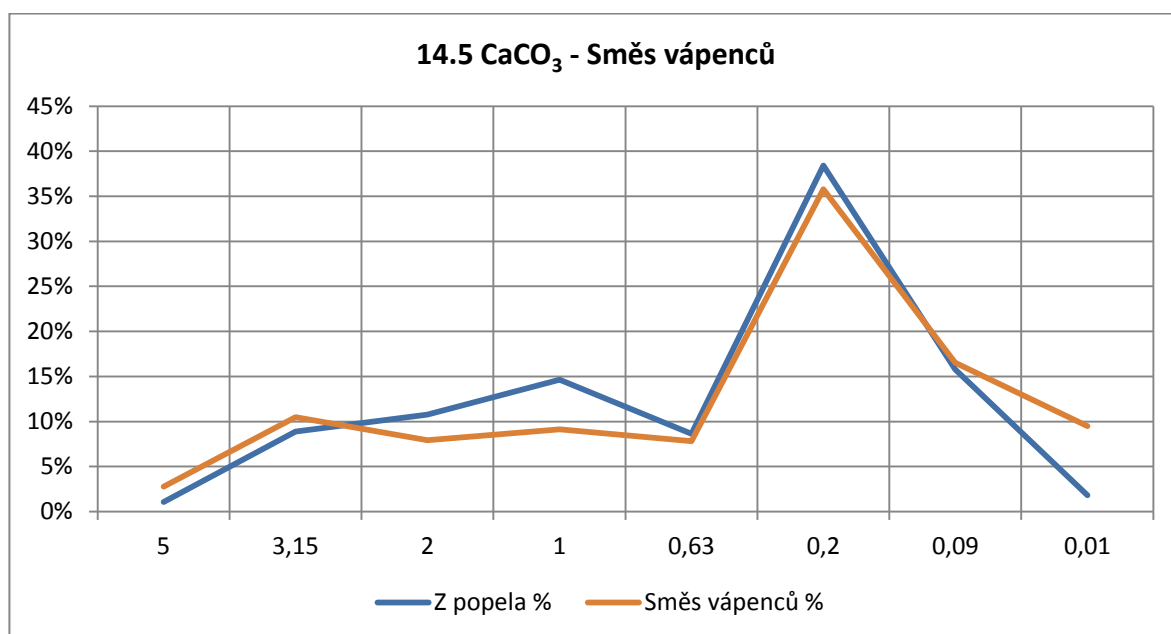
Obr. 5.21 Porovnání nezkalcinovaného vápence v popelu s granulometrií surového vápence



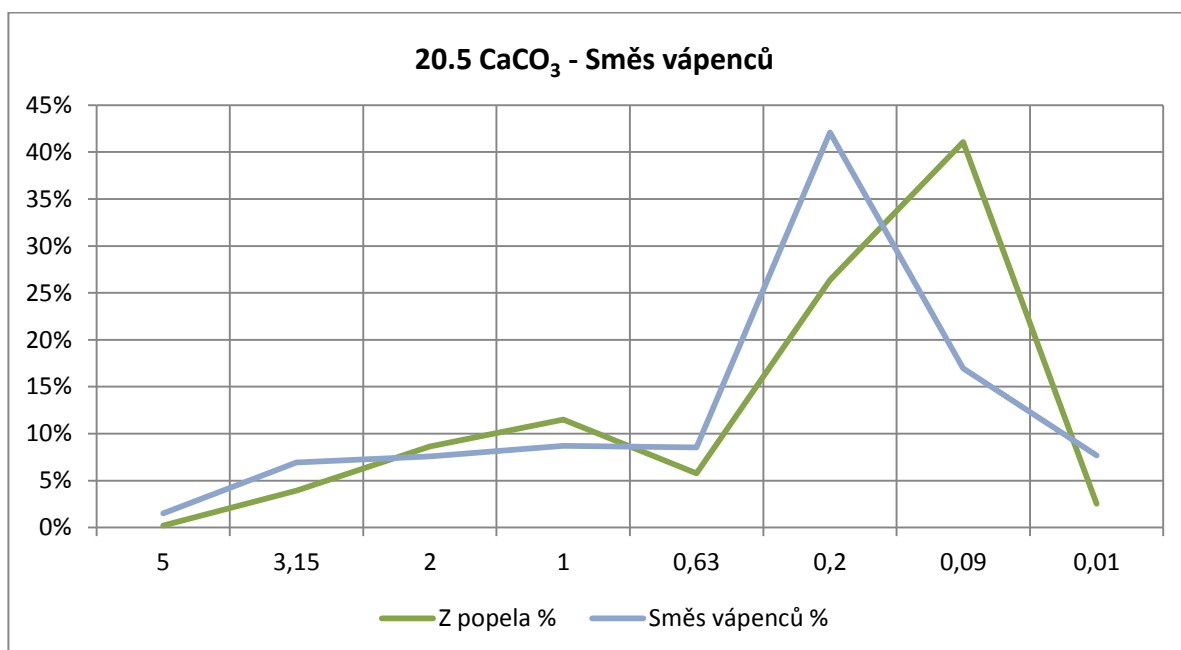
Obr. 5.22 Porovnání nezkalcinovaného vápence v popelu s granulometrií surového vápence

Z grafů je patrný rozdíl mezi granulometrií surového vápence a nezkalcinovaného vápence z ložového popela. Z tohoto grafu se dá usoudit, že na nezkalcinovaném vápenci se nepodílí pouze hrubozrný vápenec, ale že jemné složky musí být dotovány z dávkování standardního jemného vápence, čímž zároveň dojde i k poklesu procentního obsahu hrubších částic.

Vzhledem k tomuto byly granulometrie CaCO<sub>3</sub> z popela porovnány s granulometrií směsi hrubozrného a standardního jemného vápence.



Obr. 5.23 Porovnání nezkalcinovaného vápence v popelu s granulometrií směsi vápenců



Obr. 5.24 Porovnání nezkalcinovaného vápence v popelu s granulometrií směsi vápenců

Z grafů je patrná shoda granulometrie vstupního vápence s granulometrií nezkalcinovaného vápence z popela. Tato skutečnost se dá vysvětlit faktem, že na nezreagovaném vápenci v popelu, odcházejícím z kotle se podílí nejen hrubozrný vápenec, ale rovněž vápenec jemnozrný. Hrubší zrna vápence částečně kalcinují, ale již se nepodílí na odsířovacích reakcích. [8, 9, 10, 12, 15]

Pokud shrneme výsledky zkoušek s hrubozrným vápencem, můžeme konstatovat následující fakta:

- Pouze dávkováním hrubozrného vápence nelze odsířit kotel K12 – nedostatečná dopravní kapacita vápencových tras.
- Odsíření se účastní pouze velmi málo částic vstupujícího vápence větších než 0,63 mm.
- Zhruba 30 % vápence vstupujícího do kotle z něj odchází nezkalcinováno.
- Na nezkalcinovaném vápenci odcházejícím z kotle se podílí rovněž standardní jemnozrný vápenec
- V obsahu síry dle dodavatele a dle Laboratoře ETI jsou značné rozdíly.
- Palivo vykázané během zkoušek neodpovídá množství z něj vyrobené páry.

Vzhledem k výsledkům předchozích zkoušek bylo nutné provedení nových zkoušek pouze s dávkováním jemnozrnného vápence, aby byl prokázán poměr Ca/S a ostatní parametry odsíření bez vlivu hrubozrnného vápence. Bylo tedy rozhodnuto o provedení nových zkoušek.

## 6 Zkoušky odsíření jemnozrnným vápencem

Zkoušky na odsíření FK12 jemnozrnným vápencem proběhly za stejných podmínek. Stav a funkce všech zařízení odpovídala stavu jako při zkouškách pro hrubozrnný vápenec.

### 6.1 Průběh zkoušky

Vlastní zkoušky proběhly v termínu 28. 8. - 3. 9. 2014. Během zkoušek byl do kotlů dávkován jen jemnozrnný vápenec v takovém množství, aby bylo dosaženo emisního limitu.

Zkoušky byly prováděny pro dva (tři) způsoby dávkování. V první části zkoušek (28. 8. 10:00 až 31. 8. 7:00) byl do lože primárně dávkován jemnozrnný vápenec linkou EMA (určenou pro dávkování hrubozrnného vápence) a pneumatickou linkou 21, 22 nebo 23 bylo regulováno odsířování. Dne 31. 8. došel kolem 7:00 vápenec v síle EMA a následně se do kotle dávkoval vápenec pouze pneumaticky. Linka EMA byla odstavena.

Rozvrh dávkování vápence:

28. 8. - EMA v trvalém provozu, 23 vykrývá špičky

29. 8. - EMA v trvalém provozu, mezi 5:00 -13:00 vykrývá špičky 21,22, po zbytek času 23

30. 8. - EMA v trvalém provozu, 23 vykrývá špičky omezeně Mezi 10:00-12:00

31. 8. - EMA končí provoz v cca 7:00, pak 23 v trvalém provozu, 21, 22 vykrývají špičky

1. 9. - 21, 22 v trvalém provozu, 23 vykrývá špičky

2. 9. - 23 v trvalém provozu, 21, 22 vykrývá špičky

3. 9. - 23 v trvalém provozu, 21, 22 vykrývá špičky

Spotřeby uhlí, vápence a výkon kotle během zkoušek jsou uvedeny v následující tabulce. Spotřeba uhlí je v tomto případě dopočtena z vyrobeného tepla (účinnost kotle volena 91,5% stejně jako v případě zkoušek s hrubozrnným vápencem z důvodů srovnání obou zkoušek).

Tab. 6.1 Spotřeby uhlí a vápence v poměru k výkonu kotle

Datum	Výroba tepla K12 [GJ]	Spotřeba uhlí K12 [t]	Vápenec sila QVB [t]	Vápenec sila EMA [t]	Vápenec celkem [t]
28.8. 2014	13 051	1 285	57	110	167
29.8. 2014	11 633	1 130	38	95	133
30.8. 2014	13 190	1 276	0	160	160
31.8. 2014	13 226	1 294	110	30	140
1.9. 2014	13 078	1 170	152	0	152
2.9. 2014	12 918	1 286	98	0	98
3.9. 2014	11 652	1 086	97	0	97
Suma	88 749	8 527	552	395	947

Pozn. Hodnoty spotřeby paliva dle velínu zauhlování jsou v době zkoušek o cca 20 % nižší než uváděné hodnoty, spotřeba vápence EMA dle ŘS je nižší o cca 4 %)

Zároveň byla sledována výhřevnost paliva, obsah vody, popela a síry v surovém palivu. Všechny tyto údaje jsou téměř shodné s palivem použitým při zkouškách s hrubozrnným vápencem.

Tab. 6.2 Hodnoty vzorků paliva odebraných při zkouškách

Datum	Laboratoř Qir MJ/kg	Dodavatel Qir MJ/kg	W <sup>r</sup> %	A <sup>r</sup> %	S <sup>r</sup> %
28.8. 2014	11,10	10,95	35,500	22,690	1,280
29.8. 2014	11,25	11,25	33,160	24,050	1,320
30.8. 2014	11,30	11,30	35,930	21,320	1,240
31.8. 2014	11,17	11,09	35,280	22,440	1,220
1.9. 2014	12,22	12,34	37,120	17,250	1,160
2.9. 2014	10,98	11,27	34,540	22,810	1,210
3.9. 2014	11,73	11,98	36,830	18,550	1,170
Průměr	11,39	11,45	35,48	21,30	1,23

V tabulce jsou v tomto případě uvedeny dvě výhřevnosti se zanedbatelným rozdílem. Pro výpočet byly použity hodnoty laboratoře.

Na základě vlastností paliva (W, A, S) dle katalogu paliv dodavatele uhlí bylo dopočteno průměrné prvkové složení paliva. Dále byl proveden přepočtení výhřevnosti udávané dodavatelem v katalogu paliv na průměrné hodnoty obsahu W, A, S a bylo konstatováno, že tato hodnota se shoduje s průměrnou výhřevností.

Na základě složení paliva byl proveden stechiometrický výpočet, dle kterého je potřeba spaliny odsířit na 92,1 %, aby bylo dosaženo hodnot emisí oxidů síry 450 mg/Nm<sup>3</sup>.

Ve výpočtu bylo počítáno se spalitelností síry v palivu 98 % (tzn. obsah pyritické a organické síry). Dále je počítáno s čistotou jemného vápence 98 %.

Na základě uvedených hodnot byl proveden výpočet poměrů Ca/S a to jak pro množství paliva, které bylo vykázáno, že bylo spáleno při zkouškách tak pro množství paliva, které bylo vypočteno z výroby páry pro účinnost kotle 91,5 %. Deklarované množství dávkovaného vápence nebylo nijak upravováno.

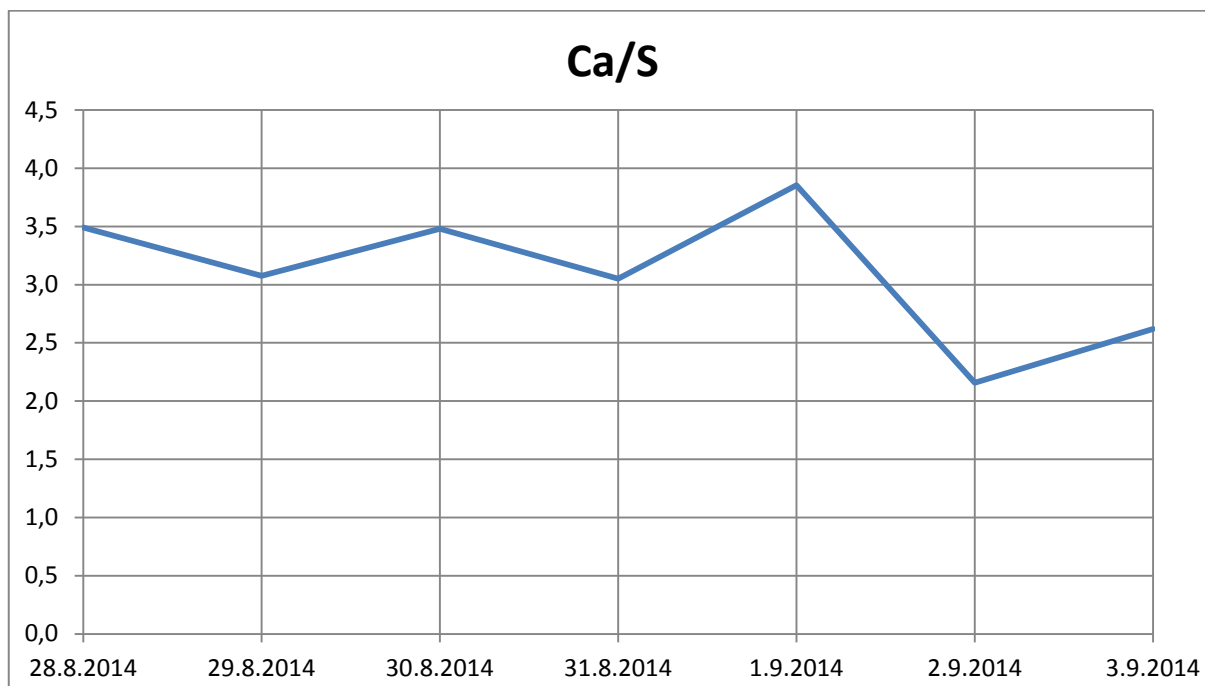
Stupeň odsíření spalin, čistota vápence (jak jemnozrnného tak hrubozrnného) je při obou výpočtech uvažována stejně. [8, 9, 10, 12, 15]

Výsledky výpočtů jsou uváděny v následující tabulce.

Tab. 6.3 Vypočtené poměry Ca/S

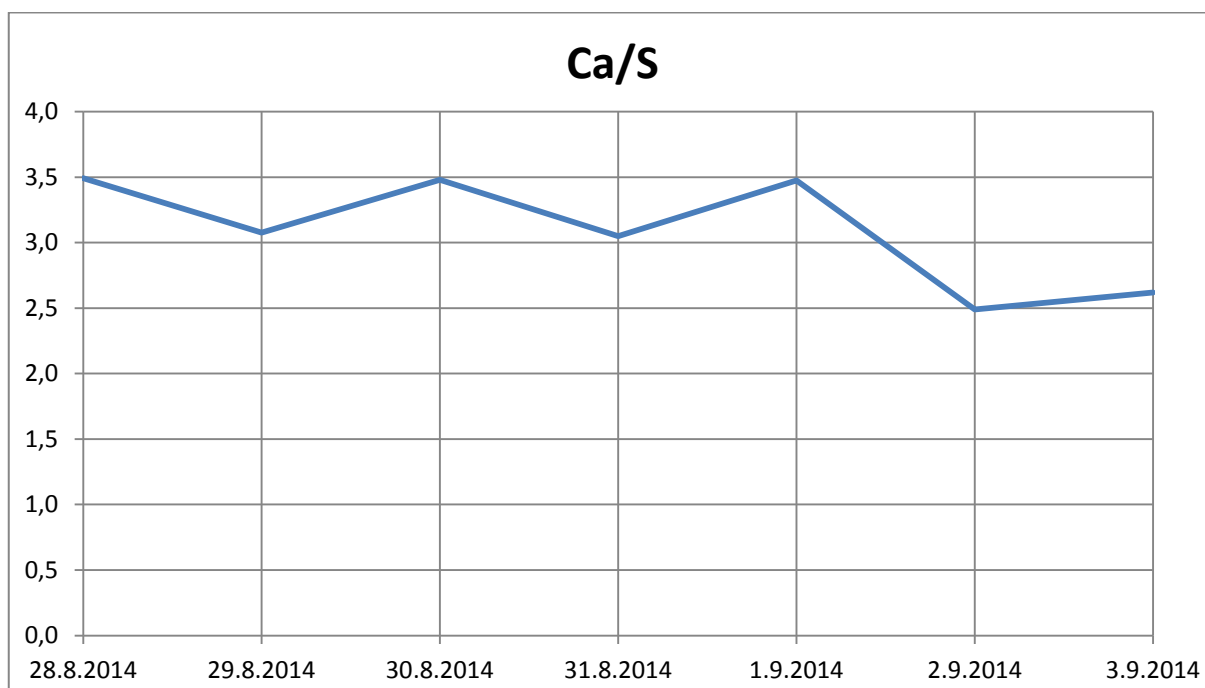
Vypočt. uhlí	Uhlí K12 výpočet	Síra v palivu	Síra odsířená	Ca ve vápenci	Ca v popelu	Ca/S Dodavatel
	t	t	t	t	t	mol/mol
28.8. 2014	1 285	16,5	15,0	167	65	<b>3,5</b>
29.8. 2014	1 130	14,9	13,6	133	52	<b>3,1</b>
30.8. 2014	1 276	15,8	14,4	160	63	<b>3,5</b>
31.8. 2014	1 294	15,8	14,4	140	55	<b>3,1</b>
1.9. 2014	1 170	13,6	12,4	152	60	<b>3,9</b>
2.9. 2014	1 286	15,6	14,2	98	38	<b>2,2</b>
3.9. 2014	1 086	12,7	11,6	97	38	<b>2,6</b>
Celkem	8 527	104,8	96	947	371	<b>3,1</b>

Jak je patrné z těchto tabulek, činí rozptyl průměrných hodnot Ca/S při zkouškách s jemnozrnným vápencem 2,2- 3,9 (mol/mol). Vypočtené hodnoty byly vyneseny do grafů.



Obr. 6.1 Grafické znázornění vypočtených hodnot Ca/S

Jak je patrné z tohoto grafu, pohybují se v první části zkoušek hodnoty Ca/S mezi hodnotami 3,1-3,5. Pak následuje velký výkyv nahoru a dolů (z 3,9 na 2,2). Pro takovýto výkyv není vysvětlení. Pokud bychom ovšem přesunuli spotřebu cca 15 t vápence (méně než 10 % denní spotřeby) z 1. 9. na 2. 9., dojde ke značnému srovnání grafu.



Obr. 6.2 Grafické znázornění vypočtených hodnot Ca/S

Ať už použijeme kterýkoli graf, vždy je patrný výrazný pokles poměru Ca/S v posledních dvou dnech zkoušek. V tyto dny byla v provozu linka 23 a linky 21, 22 pouze vykrývaly špičky.

Stejná konfigurace zařízení byla v provozu i dne 31. 8.. V tento den se ovšem ještě v ranních hodinách provozovala linka EMA, která tak ovlivňuje výsledky.

1. 9. byla v základu provozována linka 21, 22 a linka 23 vykrývala špičky (linky 21 a 22 jsou zaústěny do kotle přibližně do stejné úrovně jako EMA).

Během zkoušek byly rovněž prováděny rozbory filtrového popílku a ložového popela na nedopal, CaO, CaSO<sub>4</sub> a CaCO<sub>3</sub>.



V následující tabulce jsou souhrnně uvedeny hodnoty nedopalu.

Tab. 6.4 Obsah nedopalu v úletovém a ložovém popelu

		FP - ETG 01,02 nedopal	LP - ETG 81 nedopal	LP - ETG 86 nedopal	LP - průměr nedopal
		%	%	%	%
28.8. 2014	16:00	0,40	0,67	0,34	0,51
29.8. 2014	4:00	0,42	0,48	0,56	0,52
29.8. 2014	16:00	0,40	0,47	0,55	0,51
30.8. 2014	4:00	0,19	1,24	0,12	0,68
30.8. 2014	16:00	0,82	0,87	0,54	0,71
31.8. 2014	4:00	0,24	0,50	0,44	0,47
31.8. 2014	16:00	0,59	0,39	0,46	0,43
1.9. 2014	4:00	0,72	0,26	0,24	0,25
1.9. 2014	16:00	0,59	0,87	0,17	0,52
2.9. 2014	16:00	1,34	1,13	0,47	0,80
3.9. 2014	16:00	0,64	0,44	0,74	0,59
Průměr		0,58	0,67	0,42	0,54

V další tabulce jsou uvedeny hodnoty obsahů CaO.

Tab. 6.5 Obsah nezreagovaného vápence v úletovém a ložovém popelu

		FP - ETG 01,03 CaO	LP - ETG 81 CaO	LP - ETG 86 CaO	LP průměr - CaO
		%	%	%	%
28.8. 2014	16:00	9,01	27,55	26,52	27,04
29.8. 2014	4:00	6,27	25,24	22,61	23,10
29.8. 2014	16:00		21,45	23,08	
30.8. 2014	4:00	6,31	26,51	23,19	22,59
30.8. 2014	16:00		18,98	21,66	
31.8. 2014	4:00	4,07	22,30	20,29	21,10
31.8. 2014	16:00		20,19	21,60	
1.9. 2014	4:00	5,99	21,09	24,35	21,69
1.9. 2014	16:00		20,34	20,97	
2.9. 2014	16:00		21,76	20,70	21,23
3.9. 2014	16:00		23,07	18,40	20,74
Průměr		6,33	22,59	22,12	22,36

Jak je patrné z této tabulky, chybí v některých dnech rozborů (nejsou k dispozici ani vzorky), což je nepříjemné především v posledních dvou dnech zkoušek. Průměry LP jsou počítány ze všech hodnot tak, aby jednomu rozboru FP odpovídal rozbor LP (spotřeby vápence jsou uváděny vždy za celý den). Jak je patrné z tabulky, je možno považovat obsahy CaO v popelu za stabilní.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty produktu odsíření CaSO<sub>4</sub>. Rovněž v této tabulce chybí některé hodnoty.

Tab. 6.6 Obsah produktu CaSO<sub>4</sub> po odsířovací reakci v úletovém a ložovém popelu

		FP - ETG 01,03 CaSO <sub>4</sub>	LP - ETG 81 CaSO <sub>4</sub>	LP - ETG 86 CaSO <sub>4</sub>	LP průměr - CaSO <sub>4</sub>
		%	%	%	%
28.8. 2014	16:00	15,50	21,52	30,13	25,83
29.8. 2014	4:00	16,79	22,38	27,55	24,97
29.8. 2014	16:00	17,22	34,43	30,13	32,28
30.8. 2014	4:00	10,33	30,13	30,56	30,35
30.8. 2014	16:00				
31.8. 2014	4:00	11,62	13,34	13,77	13,56
31.8. 2014	16:00				
1.9. 2014	4:00	12,91	27,55	31,42	29,49
1.9. 2014	16:00				
2.9. 2014	16:00				
3.9. 2014	16:00				
Průměr		14,06	24,89	27,26	26,08

Rovněž v případě CaSO<sub>4</sub> jsou hodnoty obsahů (s výjimkou rozboru ložového popela z 31. 8.) velice stabilní.

V této tabulce jsou uvedeny obsahy nezkalcinovaného vápence  $\text{CaCO}_3$ .

Tab. 6.7 Obsah nezkalcinovaného vápence v úletovém a ložovém popelu

		FP - ETG 01,03 $\text{CaCO}_3$	LP - ETG 81 $\text{CaCO}_3$	LP - ETG 86 $\text{CaCO}_3$	LP průměr - $\text{CaCO}_3$
		%	%	%	%
28.8. 2014	16:00	19,86	42,62	41,48	42,05
29.8. 2014	4:00	32,60	46,76	43,14	44,95
29.8. 2014	16:00	32,65	54,81	44,00	49,41
30.8. 2014	4:00	13,58	38,56	37,08	37,82
30.8. 2014	16:00				
31.8. 2014	4:00	13,61	33,54	35,96	34,75
31.8. 2014	16:00				
1.9. 2014	4:00	17,63	29,20	32,31	30,76
1.9. 2014	16:00				
2.9. 2014	16:00				
3.9. 2014	16:00				
Průměr		21,66	40,92	39,00	39,96

Jak je patrné z této tabulky, dosahují hodnoty nezkalcinovaného vápence značně vysokých hodnot (zvláště v případě ložového popela), vyšších než v případě dávkování hrubozrnného vápence.

Pokud u ložového popela provedeme součet obsahů  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  a  $\text{CaCO}_3$  dostaneme se na hodnoty 90 i více procent, což je nereálné. Orientačním výpočtem bylo prokázáno, že aby bylo možno dosáhnout hodnot dle rozborů (popílek : popel 70:30), muselo by být do kotle dávkováno cca 2x více vápence než je při zkouškách vykázáno a poměr Ca/S by přesáhl hodnotu 7,5. Dá se tedy konstatovat, že uvedené hodnoty nelze použít bez úprav a je potřeba je korigovat a to především v obsahu  $\text{CaO}$ .

V prvním kroku byla provedena hmotnostní bilance produkce tuhých zbytků spalovacího procesu (pozn. Do tabulky jsou již zahrnuty dále iteračně stanovené výsledky). Při výpočtu  $\text{CaSO}_4$  se vycházelo z množství síry přivedené do kotle v palivu.

Tab. 6.8 Produkce tuhých zbytků (s iteračně stanovenými výsledky)

	Uhlí	Vápenec suma	Popeloviny	Nečistoty vápenec	CaSO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaO	Nedopal	Celkem tuhých zbytků
	t	t	t	t	t	t	t	t	t
28.8. 2014	1 285	167	292	3	64	6	62	3	429
29.8. 2014	1 130	133	272	3	58	10	44	2	388
30.8. 2014	1 276	160	272	3	61	29	46	2	414
31.8. 2014	1 294	140	290	3	61	24	38	2	419
1.9. 2014	1 170	137	202	3	53	33	35	2	327
2.9. 2014	1 286	113	293	2	60	4	35	2	397
3.9. 2014	1 086	97	201	2	49	13	25	2	293
Celkem	8 527	947	1 822	19	406	118	286	16	2 668

Následně bylo stanoveno procento CaSO<sub>4</sub> v tuhých zbytcích a toto bylo porovnáno s hodnotami získanými z rozborů popela. Pro stanovení hodnot je uvažováno s rozdělením popílek : popel 70 % : 30 %.

Tab. 6.9 CaSO<sub>4</sub> vypočtené a z rozborů

	Výpočet			Rozbory
	CaSO <sub>4</sub>	TZ	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>
	t	t	%	%
28.8. 2014	64	429	14,8%	18,6%
29.8. 2014	58	388	14,9%	19,2%
30.8. 2014	61	414	14,8%	16,3%
31.8. 2014	61	419	14,6%	12,2%
1.9. 2014	53	327	16,1%	17,9%
2.9. 2014	60	397	15,2%	
3.9. 2014	49	293	16,8%	
Celkem	406	2 668	15,2%	16,9%

Jak je patrné z této tabulky, vykazují vypočtené hodnoty značnou shodu s hodnotami stanovenými dle rozboru. Tato shoda by byla ještě výraznější, pokud by bylo uvažováno s vyšším procentem popílek. [8, 9, 10, 12, 15]

V rámci dalšího výpočtu bylo uvažováno, že hodnoty získané rozboru CaO jsou správné. Pro další výpočet bylo nezbytné stanovit obsah CaO v popílků během posledních dvou dnů

zkoušek, kdy nebyly provedeny rozборы. Tyto hodnoty byly stanoveny na cca 3,5 %, což je o něco méně než jsou hodnoty z předchozích dnů. Pokud by ovšem tyto hodnoty byly vyšší, a pokud by platily hodnoty z předchozí tabulky (Tab. 6.8), dostaly by se hodnoty obsahu  $\text{CaCO}_3$  do záporných hodnot, což je samozřejmě nemožné.

Tab. 6.10 Obsah CaO v ložovém a filtrovém popelku

CaO	FP	LP	Celkem
	%	%	%
28.8. 2014	9,01	27,04	14,42
29.8. 2014	6,27	23,10	11,32
30.8. 2014	6,31	22,59	11,19
31.8. 2014	4,07	21,10	9,18
1.9. 2014	5,99	21,69	10,70
2.9. 2014	<b>3,50</b>	21,23	8,82
3.9. 2014	<b>3,50</b>	20,74	8,67

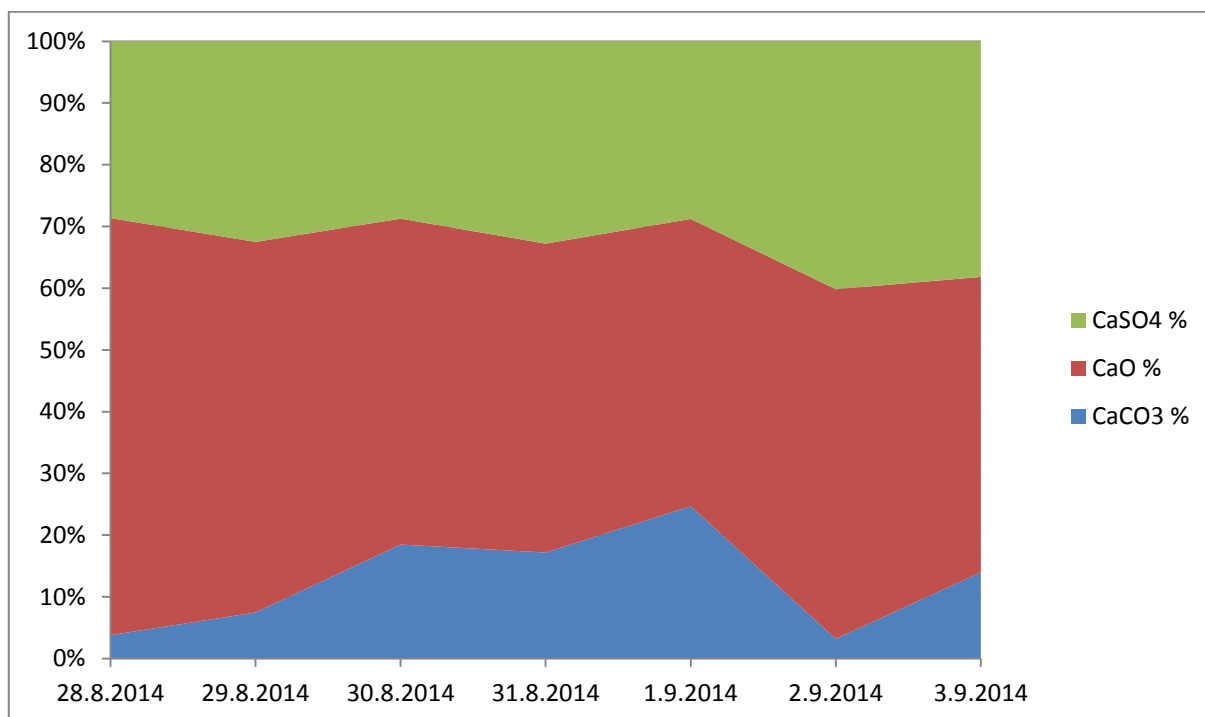
Následně byly z bilancí dopočteny hodnoty obsahu  $\text{CaCO}_3$  v tuhých zbytcích spalovacího procesu a následně bylo stanoveno i procentuální využití vápníku pro tvorbu jednotlivých sloučenin odsířovacího procesu.

V posledním sloupci tabulky je uvedena převrácená hodnota procentního využití vápníku pro tvorbu  $\text{CaSO}_4$ , což je hodnota molového poměru Ca/S stanoveného z produktu odsířovacího procesu.

Tab. 6.11 Poměr Ca/S stanovený z produktu  $\text{CaSO}_4$  vznikajícího při odsířovacím procesu

	Produkty odsíření			Využití vápníku			Ca/S
	CaO	CaSO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaO	CaSO <sub>4</sub>	
	%	%	%	%	%	%	
28.8. 2014	14,4%	14,8%	1,4%	3,8%	67,6%	28,6%	3,5
29.8. 2014	11,3%	14,9%	2,5%	7,5%	60,0%	32,5%	3,1
30.8. 2014	11,2%	14,8%	7,0%	18,5%	52,8%	28,7%	3,5
31.8. 2014	9,2%	14,6%	5,6%	17,2%	50,0%	32,8%	3,1
1.9. 2014	10,7%	16,1%	10,1%	24,7%	46,6%	28,8%	3,5
2.9. 2014	8,8%	15,2%	0,9%	3,2%	56,6%	40,2%	2,5
3.9. 2014	8,7%	16,8%	4,5%	14,0%	47,9%	38,2%	2,6
Celkem	10,8%	15,2%	4,3%	12,8%	55,1%	32,2%	3,1

Procentuální využití vápence v odsířovacím procesu je pak graficky zpracováno v následujícím grafu. [8, 9, 10, 12, 15]



Obr. 6.3 Grafické znázornění obsahu CaO, CaCO<sub>3</sub> a CaSO<sub>4</sub> v tuhých zbytcích

### 6.1.1 Výsledky zkoušek s jemnozrnným vápencem

Pokud shrneme výsledky druhých zkoušek do několika bodů, můžeme konstatovat:

- Spotřeba jemnozrnného vápence během zkoušek se jeví jako velice stabilní bez výrazných výkyvů
- Poměr Ca/S vypočtený ze spotřeby paliva a vápence v době provozu linky EMA se pohybuje mezi hodnotami 3,1 - 3,5.
- Poměr Ca/S v době, kdy byla provozována linka 21, 22 v základu a linka 23 vykrývala špičky, se pohybuje na stejné úrovni jako při provozu linky EMA
- Poměr Ca/S v posledních dvou dnech zkoušky, kdy byla provozována linka 23 v základu a linky 21 a 22 vykrývaly špičky, poklesl až na hodnotu 2,6
- Rozbory popele a popílku na obsah CaSO<sub>4</sub> potvrzují zvýšený podíl využití vápence, bohužel již nebyly provedeny v posledních dnech zkoušky
- Pokud vyjdeme z rozborů popele a popílku na obsah CaO zjistíme, že podíl nezkalcinovaného vápníku se na celkové bilanci vápníku podílí necelými 13 % (bohužel poslední dva dny nebyly provedeny kompletní rozbor)

## 7 Srovnání výsledků obou zkoušek

V této kapitole se pokusíme srovnat výsledky zkoušek s hrubozrnným vápencem, které proběhly na kotli K12 v květnu roku 2014 se zkouškami s jemnozrnným vápencem, které proběhly na přelomu srpna a září téhož roku.

Zkoušky s hrubozrnným vápencem probíhaly po dobu dvou týdnů s průměrným výkonem kotle 283 t/h

Zkoušky s jemnozrnným vápencem trvaly 7 dnů s průměrným výkonem kotle 196 t/h.

Emise SO<sub>2</sub> během zkoušky s hrubozrnným vápencem se pohybovaly okolo hodnoty 450 mg/Nm<sup>3</sup>. Při zkouškách s jemnozrnným vápencem byly dosahovány hodnoty 400 mg/Nm<sup>3</sup>.

Vlastnosti paliv byly v případě obou zkoušek prakticky stejné (viz následující tabulka), rovněž rozptyl během jednotlivých zkoušek byl minimální.

Tab. 7.1 Vlastnosti paliv při obou zkouškách

	Q <sub>ir</sub>	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>
	MJ/kg	%	%	%
Hrubozrnný vápenec	11,54	36,32	20,44	1,24
Jemnozrnný vápenec	11,39	35,48	21,30	1,23

Pokud srovnáme průměrnou hodnotu Ca/S = 5 během zkoušek s hrubozrnným vápencem s průměrnou hodnotou během zkoušek s jemnozrnným vápencem Ca/S = 3,1, můžeme konstatovat výrazné snížení spotřeby vápence. V případě dílčích hodnot ze zkoušek s jemnozrnným vápencem při provozu linky EMA činí hodnota Ca/S=3,4.

Snížení molového poměru Ca/S může být částečně způsobeno i nižším výkonem kotle během zkoušek s jemnozrnným vápencem, na druhou stranu však byly při zkoušce s jemnozrnným vápencem drženy nižší hodnoty emisí SO<sub>2</sub>.

Při porovnání rozborů popela a popílku na obsah nedopalu, nebyl zaznamenán žádný výrazný rozdíl.

Při srovnání rozborů na obsah CaO, CaSO<sub>4</sub> a CaCO<sub>3</sub> můžeme konstatovat (i přes absenci některých rozborů a případné chyby v rozbořech) zvýšené procento využití vápence na odsířovací reakci.

Zároveň je možno konstatovat, že se značně snížilo procento nezkalcinovaného vápence z cca 30 % (hrubozrnný) na 13 % (jemnozrnný) tzn. rozdíl 17 %, čímž byla následně umožněna i lepší odsířovací reakce. Pokud provedeme přepočítání výsledků s hrubozrnným vápencem o výše uvedených nezkalcinovaných 17 %, dostáváme se na hodnotu Ca/S = 4,2, což je vyšší hodnota než v případě vápence jemnozrnného provozovaného s linkou EMA (Ca/S=3,1).

Rozdíl mezi hodnotami Ca/S 4,2 a 3,1 představuje nejen množství vápence, které je do kotle dávkováno navíc, ale také značné množství tepla potřebného pro kalcinaci vápence (183 kJ/mol). Pokud přepočítáme takto navíc spotřebované teplo na účinnost kotle, zjistíme pokles účinnosti kotle o cca 0,54 % (přibližná hodnota, není zahrnuto fyzické teplo tuhých zbytků).

Jedním z důvodů může být posun rozdělení tuhých zbytků spalovacího procesu. V případě zkoušek s hrubozrnným vápencem bylo uvažováno s rozdělením popílek : popel 70:30, stejně jako v případě vápence jemnozrnného. V případě použití jemnozrnného vápence by podíl popílku měl být teoreticky vyšší než v případě vápence hrubozrnného.

Pokud pomineme nepřesnosti výpočtu, chybějící rozborů apod., můžeme uvažovat, že nezkalcinování velké části vápence není jediným problémem dávkování hrubozrnného vápence do kotle K12 a projevují se zde i další vlivy.

Projevit se zde může například i skutečnost, že do kotle se dostává větší množství těžších zrn vápence, které vyžadují větší odvod ložového popela a tím sebou odvádějí i část nezkalcinovaného vápence, který ještě nestačil zreagovat s SO<sub>2</sub>. Dále tento zvýšený odvod tuhých zbytků může zapříčinit větší nedopal v ložovém popelu a také větší odvod tepla ze spalovací komory.

Dále se zde může projevovat vliv zaústění dávkování vápence do spalovací komory. Linka EMA i linky 21 a 22 jsou zaústěny až do dna spalovací komory, kde jsou podmínky pro kalcinaci dosti nevhodné.



Linka 23 je zaústěna výše a při jejím provozu jako základu se dosahují vyšší hodnoty využití vápence. Bohužel tento provoz trval jen poslední dva dny zkoušek, ze kterých navíc chybí některé rozbory. [8, 9, 10, 12, 15, 16, 18]

## Závěr

Na základě předchozích kapitol lze konstatovat, že dávkování hrubozrnného vápence do kotle oproti dávkování vápence jemnozrnného zvyšuje molární podíl Ca/S z 3,1 na 5. Zároveň je možno konstatovat, že značná část vápencem kotlem prochází nezkalcinovaná.

Pokud v případě dávkování hrubozrnného vápence přepočteme procentní hodnoty nezkalcinovaného vápence (cca 30 %) na hodnoty zkoušek s jemnozrnným vápencem (cca 13 %) a rozdíl zrušíme, jako by do kotle nevstupoval, dostáváme se na poměr Ca/S=4,2, čemuž odpovídá snížení účinnosti kotle oproti dávkování jemnozrnného vápence o cca 0,5 %.

Zároveň s tímto roste z důvodu většího množství dávkovaného vápence i množství vyprodukovaných tuhých zbytků spalovacího procesu o cca 15 %, čímž opět klesá účinnost kotle. Zároveň roste produkce spalín a roste vlastní spotřeba.

Vzhledem k tomuto nelze z hlediska energetického doporučit používání hrubozrnného vápence pro odsíření kotle.

Další otázkou je zaústění dopravních linek vápence do kotle. V současné době jsou do kotle zaústěny 3 pneumatické linky dávkování vápence (21, 22, 23) a mechanická linka EMA dávkování vápence do paliva. Tři z těchto linek (EMA, 21, 22) jsou zaústěny prakticky až těsně nad dno kotle. Linka 23 je zaústěna těsně pod „sedlo“ rozděleného dna spalovací komory v těsné blízkosti stěny.

Při zkouškách s jemnozrnným vápencem byla poslední dva dny linka 23 provozována trvale a linky 21 a 22 v případě potřeby vykrývaly špičky. Při tomto způsobu provozu vykazoval kotel podstatně nižší spotřebu vápence než při provozu s jinou linkou v základu. Hodnota Ca/S

při provozu linky 23 se pohybovala na úrovni cca  $\text{Ca/S}=2,6$ . Zatímco v ostatních dnech činila hodnota v průměru  $\text{Ca/S}=3,4$ , přičemž rozdíly mezi provozem ostatních linek nebyly výrazné.

Zkoušky s linkou 23 trvaly ovšem pouze dva dny, takže výchozí hodnoty spotřeb mohou být ovlivněny okolnostmi, o kterých nevíme. Proto by bylo vhodné zopakování těchto zkoušek s dávkováním jemnozrnného vápence linkami 21, 22 a 23 po delší dobu (již není nutné zkoumat dávkování jemnozrnného vápence linkou EMA) pouze z hlediska spotřeby uhlí a vápence bez nutnosti dělat dodatečné rozborů tuhých zbytků.

Zároveň s tímto by bylo vhodné přepojení jedné z linek 21 nebo 22 do stejného místa jako je linka 23, ovšem z druhé strany kotle.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Elektrárna Tisová* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/tisova.html>
- [2] MERTL, Miroslav. *Generátory 61- 63MKA*. Tisová: ČEZ, a. s., OJ Teplárny, 2011.
- [3] BEJR, Karel. *Provozní předpis pro obsluhu fluidního kotle FK12*. Tisová: ČEZ, a. s., OJ Teplárny, 2015.
- [4] VACHUN, Rudolf. *Fluidní kotle*. Tušimice: VSE a. s., 1999.
- [5] BEJR, Karel. *Technická dokumentace, Dávkování interního ložového materiálu do FK12*. Tisová: ČEZ, a. s., OJ Teplárny, 2013.
- [6] *Fluidní kotel s cirkulující vrstvou - schéma* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:  
<http://fsinet.fsid.cvut.cz/cz/U218/peoples/hoffman/PREDMETY/COVP/Covpe-3.htm>
- [7] *Fluidní kotel s cirkulující vrstvou - schéma* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:  
<http://fsinet.fsid.cvut.cz/cz/U218/peoples/hoffman/PREDMETY/COVP/Covpe-3.htm>
- [8] VILIMEC, Ladislav. *Metody spalování ve fluidní vrstvě*. Chomutov: VSE a. s., 1999.
- [9] HÁLA, Slavoj. *Hodnocení fosilních hořlavin a produktů, jejich zpracování*. Chomutov: VSE a. s., 2006.
- [10] HASAL P., SCHREIBER I., ŠNITA D., et al. *Chemické inženýrství I*. 2nd ed. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7
- [11] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [12] IBNER, Zbyněk. *Energetika v příkladech*. Praha: BEN - Technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.

- [13] ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. *Parní kotle*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [14] JANSKÝ, Karel. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1954.
- [15] STEJSKAL, Pavel a Pavel ŠTRONER. *Odsíření I, II*. Chomutov: VSE a. s., 2008.
- [16] STEJSKAL, Pavel a Pavel ŠTRONER. *Konstrukce kotlů*. Chomutov: VSE a. s., 2008.
- [17] ŠKORPIL, Jan. *Energetika v životním prostředí*. Chomutov: VSE a. s., 1993.
- [18] KUDLOVSKÝ, Ján. *Obsluha kotlů*. Bratislava: ALFA, 1980.