
Gemeinsamer Bericht der Bayer. Landesämter für Umweltschutz und für Wasserwirtschaft über die Untersuchung der

Klärschlamm-trocknungsanlage des Abwasserzweckverbands Füssen

Augsburg, 2003

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (08 21) 90 71 – 0
Fax: (08 21) 90 71 – 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Projektleiter: Dr.-Ing. Clemens Marb
Bearbeiter: Thomas Bogner, Jens Fleischer (01.08.2001 – 07.08.2002), Magdalena Schindler, Michael Schuller (LfU)
Dr. Herbert Hruschka, Hans Siewert (LfW)

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Josef-Vogl-Technikum
Am Mittleren Moos 46, 86167 Augsburg
Tel.: (08 21) 70 00 – 2 90
Fax: (08 21) 70 00 – 2 99
E-Mail: josef-vogl-technikum@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.):
Klärschlamm-trocknungsanlage Abwasserzweckverband Füssen – Gemeinsamer Bericht der Bayerischen Landesämter für
Umweltschutz und für Wasserwirtschaft, Augsburg, 2003

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des
Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Aufgabenstellung	3
2	Anlagenbeschreibung.....	5
2.1	Kläranlage	5
2.2	Solare Klärschlamm-trocknungsanlage	8
3	Versuchsdurchführung und Anlagenbetrieb	11
4	Untersuchungsprogramm, Messstellen und Probenahme	13
4.1	Mess- und Probenahmestellen	13
4.2	Analysen- und Messverfahren	17
4.2.1	Klärschlamm.....	17
4.2.2	Abluft.....	18
5	Untersuchungsergebnisse	23
5.1	Maschinelle Schlammentwässerung	23
5.2	Solare Trocknung.....	24
5.2.1	Klärschlamm-eigenschaften, -zusammensetzung.....	24
5.2.1.1	Physikalisch-chemische Parameter, Elementarzusammensetzung.....	24
5.2.1.2	Anorganische Komponenten	29
5.2.1.3	Organische Komponenten	30
5.2.2	Abluftemissionen	39
5.2.2.1	Anorganische Komponenten	39
5.2.2.1.1	Kohlenstoffmonoxid	39
5.2.2.1.2	Kohlenstoffdioxid.....	39
5.2.2.1.3	Gasförmige anorganische Chlorverbindungen.....	39
5.2.2.1.4	Gasförmige anorganische Fluorverbindungen	40
5.2.2.1.5	Sauerstoff.....	41
5.2.2.1.6	Schwefeloxide	41
5.2.2.1.7	Stickstoffoxide	41
5.2.2.1.8	Ammoniak.....	42
5.2.2.1.9	Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Selen, Tellur, Thallium, Vanadium, Zinn und ihre Verbindungen.....	43
5.2.2.1.10	Quecksilber und seine Verbindungen	47
5.2.2.2	Organische Komponenten	48
5.2.2.2.1	Organische Stoffe.....	48
5.2.2.2.2	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane	51
5.2.2.2.3	Polychlorierte Biphenyle	53

5.2.2.2.4	Polychlorierte Benzole	55
5.2.2.2.5	Polychlorierte Phenole.....	56
5.2.2.2.6	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe.....	58
5.2.2.3	Sonstige Parameter.....	61
5.2.2.3.1	Geruch.....	61
5.2.2.3.2	Gesamtstaub.....	63
5.2.2.3.3	Volumenstrom.....	64
5.2.3	Lärmemissionen.....	67
5.2.4	Energiebedarf	67
5.2.5	Verdunstungsleistung.....	70
5.2.6	Massen- und Volumenreduktion	71
5.2.7	Betriebliche Erfahrungen.....	72
6	Zusammenfassung und Bewertung	75
7	Danksagung	79
8	Literatur	81
9	Anhang	85

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Bayerische Staatsregierung verfolgt das Ziel, aus Gründen des vorsorgenden Boden-, Gewässer- und Verbraucherschutzes die landwirtschaftliche, landschaftsbauliche und gärtnerische Verwertung von Klärschlamm mittelfristig zu beenden. Thermische Behandlungsverfahren für kommunale Klärschlämme werden daher in Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Die Ablagerung von kommunalen Klärschlämmen ist gemäß der Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung) und der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall) ab dem 2. Juni 2005 untersagt, da Klärschlämme einen organischen Anteil (Glühverlust) in der Trockenmasse (m_T) größer als 5 % $_{m_T}$ aufweisen.

Für einige thermische Verfahren stellt die vorangehende Behandlung, bestehend aus maschineller Entwässerung plus thermischer Trocknung der Klärschlämme, aus verfahrenstechnischen Gründen eine unabdingbare Notwendigkeit dar. Dabei spielen vermehrt ökonomische Gesichtspunkte, wie Einsparungen bei den Transport- und Behandlungskosten, eine entscheidende Rolle für den Bau und Betrieb von Klärschlamm-trocknungsanlagen.

In Bayern sind derzeit landesweit unterschiedlich konzipierte Klärschlamm-trocknungsanlagen im Einsatz, die überwiegend nach dem Verdampferprinzip auf Grundlage von direkten bzw. indirekten Trocknungsverfahren unter Einsatz fossiler Brennstoffe als Energieträger arbeiten. In der Trocknungszone werden bei diesen Verfahren Trockenguttemperaturen bis zu 200 °C [1] erreicht.

Der Abwasserzweckverband (AZV) Füssen betreibt seit dem Jahr 2000 auf der Kläranlage Ehrwang eine Klärschlamm-trocknungsanlage. Der Klärschlamm wird bei niedriger Temperatur (Trockenguttemperatur unter 40 °C [2]) unter Nutzung der Strahlungsenergie der Sonne und des natürlichen Feuchtigkeits-Aufnahmepotenzials der umgebenden Luft getrocknet (sogenannte solare Klärschlamm-trocknung).

Die Bayerischen Landesämter für Umweltschutz (LfU) und für Wasserwirtschaft (LfW) führten in Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim im Spätsommer/Herbst 2001 sowie im Winter/Frühjahr 2002 eine Untersuchung an dieser Anlage durch. Ziel war es, weiterführende Erkenntnisse über den Praxisbetrieb, die Emissionen und den Energiebedarf der Anlage zu erhalten.

Zur Charakterisierung der Verfahrenskenngrößen und der Schadstoffbeladungen der Stoffe und Stoffströme beinhaltete das Messprogramm neben der Untersuchung des Klärschlammes insbesondere Abluftuntersuchungen. Besonderes Augenmerk lag auf der Beladung der Abluft mit Staub inkl. an den Staub gebundenen anorganischen und organischen Schadstoffen (Metalle Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zinn; polychlorierte Dibenzodioxine/-furane, Biphenyle, Benzole, Phenole und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) sowie gasförmigen Schadstoffen (Ammoniak, Schwefel- und Stickstoffoxide, Chlor- und Fluorwasserstoff, Geruchsstoffe).

Ergänzend zu den Abluftuntersuchungen führte das LfW ein umfangreiches Feststoffprobenahme-programm zur Charakterisierung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Nassschlammes, des mechanisch entwässerten Schlammes (Input) und des getrockneten Klärschlammes über den mehrwöchigen Behandlungsprozess (Output) durch. Darüber hinaus ermittelte das LfW im Untersuchungszeitraum alle relevanten Prozessparameter zur Erstellung einer Energie- und Massenbilanz in Hinblick auf eine abschließende medienübergreifende Beurteilung des gesamten Trocknungsprozesses.

Im Rahmen der Untersuchung wurden vom Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim die Anlagen- und Betriebsdaten vom Prozessleitsystem aufgezeichnet, ausgewertet und olfaktometrische Untersuchungen in der Abluft vorgenommen.

Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenfassung, Darstellung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse der Bayerischen Landesämter für Umweltschutz und für Wasserwirtschaft.

2 Anlagenbeschreibung

2.1 Kläranlage

Die Kläranlage des AZV Füssen liegt am Westufer des Forggensees auf einer Höhe von 800 m ü. NN. Das Einzugsgebiet der Kläranlage umfasst die Stadt Füssen und die Gemeinden Schwangau, Hopferau und Eisenberg. Die Gemeinden werden überwiegend im Mischsystem entwässert, wobei bei Kanalneubauten eine Tendenz zum Trennsystem vorliegt. Das auf etwa 3 ha Grund gelegene Klärwerk hat eine Ausbaugröße von 70.000 Einwohnerwerten (EW) und ist für Nährstoffelimination ausgelegt. Die mittlere Belastung beträgt etwa 43.500 EW, wobei ca. 10.000 EW auf gewerbliche Einleitungen (kleine Brauereien, Molkereien sowie metallverarbeitende Betriebe) entfallen. Durch das saisonal bedingte Fremdenverkehrsaufkommen mit ca. 2 Millionen Übernachtungen pro Jahr unterliegt der Abwasseranfall großen saisonalen Schwankungen mit Spitzenbelastungen bis zu 140.000 EW.

Eine Übersicht der Kläranlage des AZV Füssen geben das in Abb. 1 dargestellte Luftbild und der Grundplan mit der Beschreibung der verschiedenen Anlagenteile wieder.

Der Kläranlage fließen bei Trockenwetter täglich etwa 6.000 bis 7.000 m³ Abwasser zu, bei Regenwetter bis das 4-fache dieser Menge. Zusätzlich werden an der Kläranlage ca. 900 m³ Fäkal-schlamm pro Jahr behandelt.

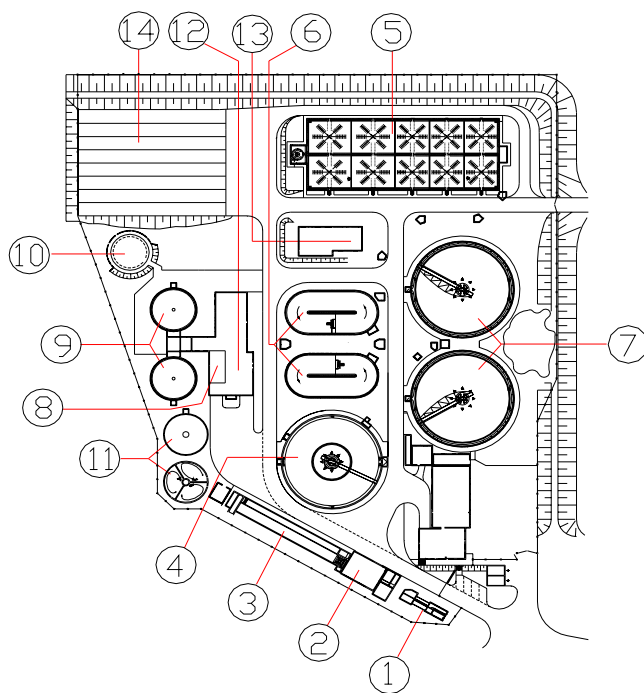
Das Abwasser fließt der Kläranlage im freien Gefälle über einen Sammelkanal mit einem Durchmesser von 1.300 mm zu. Die Tab. 1 gibt einen Überblick der durchschnittlichen Rohabwasserbelastung im Zulauf der Kläranlage.

Zunächst passiert das Abwasser einen automatischen Siebrechen mit Regenüberlauf (1) und anschließend zwei parallel angeordnete Feinrechen (2). Das Rechengut wird im Gleichstrom zur Abwasserfließrichtung mit einem Greiferkamm ausgetragen und in einer Rechengut-Waschpresse von anhaftenden organischen Stoffen befreit, entwässert und in einen Container abgeworfen. Täglich fallen etwa 0,3 bis 0,7 m³ Rechengut an, die mit dem Restmüll entsorgt werden.

Das von Sperr- und Grobstoffen befreite Abwasser fließt danach in einen belüfteten Längssandfang mit integriertem Fettabscheider (3). Dort wird das Abwasser in eine definierte Turbulenz versetzt, die die Fettstoffe aufschwimmen und den mitgeführten Sand in einem beruhigten Bereich absetzen lässt. Der sedimentierte Sand wird über einen Druckluftheber abgesaugt und in einem Sandwäscher von organisch anhaftenden Begleitstoffen befreit. Das Spülwasser wird in einem Sieb gereinigt und in die Vorklärstufe eingeleitet. Der gereinigte Sand wird mit einer Entwässerungsschnecke ausgetragen und in Container abgeworfen. In der Woche fallen etwa 1 m³ Ausschwemmgut und im Monat etwa 2 m³ Sand an.

Nach dem Sand- und Fettfang erreicht das Abwasser das Vorklärbecken (4), das in zwei Bereiche aufgeteilt ist (Kombibecken mit einem Gesamtdurchmesser 33 m). Im Innenbereich (Volumen etwa 350 m³) wird der im Rohabwasser mitgeführte Grobschlamm sedimentiert. Der äußere Bereich (Volumen etwa 1.350 m³) dient als sogenannte Bio-Phosphor-Stufe. Hier wird das Rohabwasser gezielt mit Rücklaufschlamm aus der biologischen Abwasserreinigungsstufe durchmischt.

Das mechanisch vorgeklärte Abwasser wird in einem Zyklon mit Rezirkulations- und Rücklaufschlamm vermischt und in das Belebungsbecken {zweiliniiges Kaskadenbecken (5) mit einem Gesamtvolumen von 7.330 m³} zur weiteren biologischen Behandlung geleitet. Das Abwasser durchläuft zuerst einen anaeroben (vorgeschaltete Denitrifikation) und dann einen aeroben Bereich. Im anaeroben Bereich erfolgt die Umwälzung durch ein Rührwerk und im aeroben Teil durch die feinblasige Belüftung mit Membranbelüfter. Im Anschluss an das Kaskadenbecken durchströmt das



- 1 Siebrechen mit Regenüberlauf
- 2 Gebäude mit Feinrechen
- 3 Sand- u. Fettfang
- 4 Vorklärbecken
- 5 Belebung neu (Kaskadenbecken)
- 6 Belebung alt
- 7 Nachklärbecken
- 8 Voreindicker
- 9 Faultürme
- 10 Gasbehälter
- 11 Stapelbehälter
- 12 Zentrifuge
- 13 zentrale Messstation
- 14 Klärschlamm-trocknungsanlage

Abb. 1: Luftbild und Grundplan der Kläranlage des AZV Füssen mit Anlagenteilen [2, 3]

Abwasser zwei Kreislaufbecken {alte Belebungsbecken (6) mit einem Volumen von je 2.000 m³}, die aerob oder anaerob betrieben werden können. In den Kreislaufbecken erfolgt neben dem anaeroben bzw. aeroben Abbau simultan eine Fällung von Phosphat mit Eisen(III)-chloridsulfat-Lösung (FeClSO₄). Hierzu werden dem Abwasser je kg Phosphat 14 kg FeClSO₄ zugegeben.

Zur Steuerung aller verfahrenstechnischen Abläufe (anaerobe und aerobe Verhältnisse, Belüftung, Fällung etc.) werden im Ablauf die Trübung, die Leitfähigkeit, die Temperatur, der Sauerstoff-, Phosphat- und Ammonium-Gehalt kontinuierlich gemessen, in einem Prozessleitsystem ausgewertet und protokolliert. Der Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken beträgt etwa 2,6 bis 2,7 g/l.

Aus den Kreislaufbecken fließt das Abwasser in zwei Nachklärbecken (7), in denen der Belebtschlamm sedimentiert wird. Der abgesetzte Schlamm wird von einem umlaufenden Räumler zum zentralen Schlammtrichter geschoben und gelangt als Rücklaufschlamm wieder in die biologische Reinigungsstufe. Der Schwimmschlamm wird über eine Skimmerrinne abgezogen und vor der Rechenanlage wieder in die Kläranlage gegeben. Das gereinigte Abwasser fließt über eine umlaufende Zahnschwelle zur Ablauf-Messstation und von dort im freien Gefälle in den Forggensee bzw. Lech. Da der Forggensee – ein Stausee des Lechs – zur Schneeschmelze auf- und im Herbst abgestaut wird, gelten für die Kläranlage Füssen-Ehrwang als Einleitbedingungen die strengeren Grenzwerte für stehende Gewässer. Die gemäß Wasserrechtsbescheid einzuhaltenden Werten sind den im Ablauf der Kläranlage gemessenen Mittelwerten in Tab. 1 gegenübergestellt. Die Reinigungsleistung beträgt am Endauslauf, bezogen auf die Zulaufwerte, für BSB₅ 99,2 %, CSB 95,0 %, N_{ges} 80,9 % und P_{ges} 87,0 %.

Der aus der Rücklaufschlammmenge abgezogene Überschussschlamm (zugewachsene Belebtschlammmenge) wird gemeinsam mit dem Primärschlamm aus der Vorklärung in einen statischen Voreindicker (8) gebracht, und in diesem während einer 2-tägigen Verweilzeit nochmals eingedickt. Das überstehende Schlammwasser gelangt zurück in den Abwasserbehandlungsprozess und der Dickschlamm gemeinsam mit dem Fett aus dem Fettfang in die anaerobe Stabilisierungsstufe.

Zur anaeroben Schlammstabilisierung stehen zwei Faultürme (9) mit einem Volumen von je 1.600 m³ zur Verfügung, die auf eine Temperatur zwischen 30 und 35 °C gehalten werden (mesophiler Bereich). Derzeit wird an der Kläranlage Füssen nur ein Faulturm zur anaeroben Stabilisierung eingesetzt und der zweite Turm als Nachfaulbehälter genutzt. Eine außenliegende Umwälzpumpe sorgt für die permanente Durchmischung des Faulschlammes. Die Beheizung der Faultürme wird mit einem außenliegenden Wärmetauscher, der mit Abwärme aus dem Blockheizkraftwerk versorgt wird, durchgeführt. Täglich werden etwa 30 m³ Rohschlamm in die Faultürme eingeleitet und ca. 28 m³ Faulschlamm mit einem Trockenrückstand (TR) von ca. 4 % abgezogen. Die Verweilzeit im Faulturm beträgt hierbei etwa 20 bis 30 Tage.

Das beim anaeroben Stabilisierungsprozess gebildete Faulgas, das sich aus ca. 60 Vol.-% Methan, 38 Vol.-% Kohlendioxid und 2 Vol.-% sonstigen Gasen (Stickstoff N₂, Wasserstoff H₂, Schwefelwasserstoff H₂S) zusammensetzt, wird in einem Trockengasniederdruckbehälter (10) zwischengespeichert. Täglich entsteht in den Faultürmen etwa 1.100 m³ Faulgas, das im Blockheizkraftwerk mit drei Gasmotoren verstromt wird.

Der Faulschlamm wird in Stapelbehälter (11) gepumpt, wobei gewöhnlich nur ein Behälter in Betrieb ist. Der zweite Stapelbehälter dient als Zwischenlager bei eventuellen Betriebsstörungen, wie z.B. bei einem Ausfall der maschinellen Entwässerungseinrichtung.

Tab. 1: Übersicht über die Ein- und Auslaufwerte sowie die Reinigungsleistung der Kläranlage des AZV Füssen [2]; n.b.: nicht bestimmt, k.A.: keine Angaben

Parameter	Einlauf mg/l	Auslauf mg/l	Überwachungswerte mg/l
Biologischer Sauerstoffbedarf BSB ₅	298	2,4	20
Chemischer Sauerstoffbedarf CSB	533	27	44
Ammonium-Stickstoff NH ₄ -N	41	0,4	10
Nitrat-Stickstoff NO ₃ -N	n.b.	10	k.A.
Nitrit-Stickstoff NO ₂ -N	n.b.	0,1	k.A.
Gesamtstickstoff N _{ges}	96	11	12
Gesamtphosphor P _{ges}	8	1,0	1

Zur Entwässerung des Faul- bzw. Nassschlammes wird eine Hochleistungszentrifuge der Fa. KHD Humboldt (12) verwendet. Der Nassschlamm wird vor der mechanischen Entwässerung mit einem Flockungshilfsmittel (organisches Polymer) zur besseren Entwässerbarkeit konditioniert.

Die frequenzgesteuerte Zentrifuge entwässert den Nassschlamm bei einer Frequenz von ca. 40 Hz und 3.000 Umdrehungen pro Minute von etwa 4 % auf 30 % Trockenrückstand. Bei der Maximalleistung (45 Hz) kann ein Trockenrückstand bis zu 33 % erreicht und bis zu 20 m³ Nassschlamm pro Stunde entwässert werden. Das entstehende Zentrifugat wird in die Kläranlage zugeführt und der entwässerte Schlamm über ein Förderband in Containermulden abgeworfen. Zur weiteren Behandlung wird der mechanisch entwässerte Schlamm anschließend mit einem Lkw zur 150 m entfernten solaren Klärschlamm-trocknungsanlage (14) transportiert.

2.2 Solare Klärschlamm-trocknungsanlage

Die solare Klärschlamm-trocknungsanlage des Abwasserzweckverbands Füssen (Hersteller: Fa. Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH, Alfdorf-Pfahlbronn) wurde im Jahr 1999 auf einer ehemaligen Schlamm-lagerplatte errichtet und im Jahr 2000 in Betrieb genommen. Bei der Anlage handelt es sich um vier aneinander gereihte Leichtbauhallen mit transparenter Außenhülle – vergleichbar dem Aufbau von Gewächshäusern (vgl. Abb. 2, 3).

Der in einer leeren oder teilbefüllten Halle aus Containermulden abgekippte, auf einen Trockenrückstand von etwa 28 % vorentwässerte Klärschlamm wird mit einem Radlader gleichmäßig auf der befestigten, 500 m² umfassenden Bodenplatte (1) der Halle verteilt. Die maximale Füllhöhe beträgt in der frostfreien Periode 20 bis 30 cm, bei Frostgefahr verfahrensbedingt nur 15 bis 20 cm (Reduktion der Trocknungszyklusdauer). Bei voller Auslastung ist eine tägliche Beschickung mit frisch entwässertem Klärschlamm möglich. Hierbei wird mittels eines Absperrbands, das an beliebiger Stelle innerhalb der Trocknungshalle angebracht werden kann, der Arbeitsbereich der Wendeinrichtung während der Befüllung auf den bereits mit Klärschlamm beschickten Teil der Halle eingegrenzt. Die Befüllung der gesamten Trocknungshalle erstreckt sich dabei je nach Füllmenge und Klärschlamm-anfall auf einen Zeitraum von normalerweise einer bis maximal zwei Wochen.



Abb. 2: Außenansicht der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang [2]

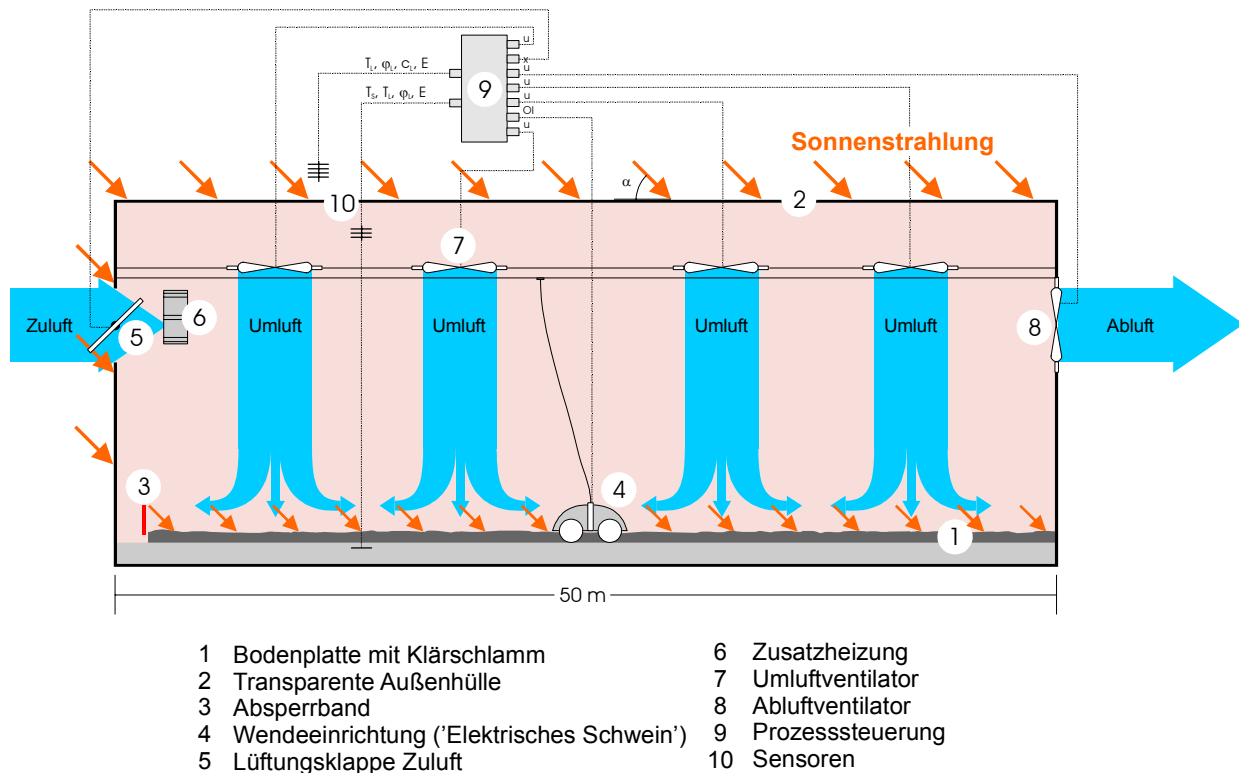


Abb. 3: Schematische Darstellung (Querschnitt) einer Trocknungshalle der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage

In Abhängigkeit vom gewünschten End-Trockenrückstand, der Jahreszeit und den Witterungsverhältnissen dauert der Trocknungsprozess bis zu 10 Wochen. Nach Beendigung der Trocknung wird der Klärschlamm am Ende der Trocknungshalle auf einer Fläche von 30 bis 50 m² zusammengeschoben. Der Lagerbereich wird mit einem Absperrband abgetrennt und die verbleibende Fläche der Trocknungshalle erneut beschickt. Nach zwei bis vier Trocknungszyklen kann dann die Trocknungshalle komplett entleert werden.

Derzeit wird an der Kläranlage Füssen jedoch ein anderer Chargenbetrieb praktiziert. Eine der vier Trocknungshallen fungiert hierbei als Zwischenlager für den mechanisch entwässerten Klärschlamm, bis eine der drei weiteren Trocknungshallen in einem Vorgang erneut komplett befüllt werden kann.

Insgesamt steht an der Kläranlage Ehrwang in vier unabhängig geregelten Hallen (Größe je Halle: L x B: 50 m x 10 m) eine Gesamtfläche von 2.000 m² zur Trocknung des maschinell vorentwässerten Klärschlamm zur Verfügung. Daraus lässt sich theoretisch eine chargenweise Behandlungskapazität von 600 m³ bei der maximal zulässigen Einbauschichthöhe von 0,30 m ableiten. In der Praxis wird an der Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang jedoch zeitgleich weniger Klärschlamm behandelt, da eine der Hallen zur Zwischenlagerung des permanent anfallenden Klärschlamm der maschinellen Vorentwässerung genutzt wird und in der Frostperiode die Hallen mit einer geringeren Einbauschichthöhe betrieben werden. Jährlich werden an der Kläranlage Ehrwang in drei Hallen ohne Abwärmenutzung etwa 2.100 Mg Klärschlamm auf einen Trockenrückstand von etwa 60 % bis 80 % getrocknet. Entsprechend den Auslegungsdaten ist unter Nutzung aller vier Hallen und der Abwärme des Blockheizkraftwerks im Sommer eine Behandlung von bis zu 3.000 Mg pro Jahr bei einem Eingangs-Trockenrückstand von 25 % bis 30 % und einem End-Trockenrückstand von 70 % möglich [4].

Die Bodenfläche ist an den Seiten und am Ende mit einer 1,1 m hohen Betonwand begrenzt, auf die die Leichtbaukonstruktion einer transparenten Außenhülle, bestehend aus einem Gerüst aus

verzinkten Stahlträgern mit transparenten, wärmedämmenden Polycarbonat-Stegplatten (2), aufbaut. Zum Einbringen und Entnehmen des Klärschlammes sind an der Hallenfront analog aufgebaute Schiebetore installiert. Die Betonwand stellt gemeinsam mit einem frontseitig anzubringenden Absperrband (3) die Begrenzung für den Arbeitsbereich der automatischen Klärschlamm-Wendeeinrichtung (4) – dem sogenannten ‚elektrischen Schwein‘, vgl. Abb. 4 – dar.

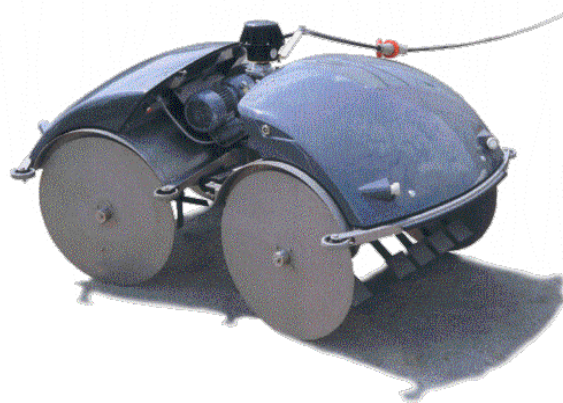


Abb. 4: Elektrische Wendeeinrichtung [2]

Das ‚elektrische Schwein‘ mischt und belüftet den Klärschlamm im Verlauf des Trocknungsprozesses in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen und dem Trockenrückstand mehrmals täglich und soll die gleichmäßige Trocknung und die Vermeidung von Geruchsbelästigungen durch anaerobe Abbauprozesse im Klärschlamm sicherstellen. Das ‚elektrische Schwein‘ verfügt zur Durchführung von Fahr- und Lenkbewegungen in der Halle über zwei rotierende, mit Scheibenrädern versehene Achsen (davon eine angetrieben) und ein motorgetriebenes Knickgelenk. Das ‚elektrische Schwein‘ erkennt dabei selbstständig über sechs Ultraschallsensoren die Hallenbegrenzungen und führt nach einem definierten Ablaufschema Umkehr- und Lenkbewegungen aus. Mit Hilfe von spatenförmigen Mischwerkzeugen, die an den Achsen angebracht sind, durchmischt und belüftet das ‚elektrische Schwein‘ den Klärschlamm über die gesamte Fläche.

Als sicherheitstechnische Vorrichtung ist an der Hallenfront hinter dem Schiebetor eine Lichtschranke angebracht, die bei Betreten der Halle die Stromzufuhr des ‚elektrischen Schweins‘ unterbricht.

Vier in der Halle installierte drehzahlgesteuerte Umluftventilatoren (7) sorgen für eine Umwälzung der Hallenluft und zwei drehzahlgesteuerte Abluftventilatoren (8), gemeinsam mit der in der Neigung verstellbaren frontseitigen Lüftungsklappe (5), für einen gezielten Austausch der feuchten Hallen- gegen trockene Umgebungsluft. Bei Bedarf kann die einströmende Umgebungsluft mit einem Wärmetauscher (6), der mit Abwärme aus der Verstromung von Faulgas im Block-Heizkraftwerk der Kläranlage betrieben wird, vorgewärmt werden.

Die Steuerung aller anlagentechnischen Komponenten erfolgt getrennt für jede Trocknungshalle auf Grundlage des Auswertergebnisses verschiedener Prozessgrößen (9): dazu werden die Schlammtemperatur, die einfallende Globalstrahlung, die Lufttemperatur und -feuchte in der Halle, die einfallende Globalstrahlung sowie die Lufttemperatur, -feuchte und die Windgeschwindigkeit außerhalb der Halle gemessen (10).

Die Anpassung des Anlagenbetriebs an den Trocknungsfortschritt erfolgt vollautomatisch in drei Stufen auf Grundlage des von der Anlagensteuerung errechneten theoretischen Trockenrückstands (Stufe 1: Belüftungsmodus bis ca. 45 % TR, Stufe 2: Kombimodus von ca. 45 % bis ca. 60 % TR, Stufe 3: Temperaturmodus ab ca. 60 % TR) oder durch manuelle Vorgabe eines im Betriebslabor an der Kläranlage aktuell ermittelten Trockenrückstands des Klärschlammes.

Der gesamte Trocknungsprozess erstreckt sich, abhängig von den Witterungsverhältnissen, der Beschickungsmenge und dem gewünschten Trocknungsgrad, über mehrere Wochen. Nach Erreichen des gewünschten Trockenrückstands (max. TR von 90 % laut Herstellerangabe möglich) wird der getrocknete Klärschlamm mit einem Radlader auf einen Lkw verladen und zur weiteren Behandlung in ein Kohlekraftwerk transportiert.

3 Versuchsdurchführung und Anlagenbetrieb

Einen Überblick über den Anlagenbetrieb und Ablauf des Untersuchungsprogramms an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen gibt Tab. 2.

Bei der Untersuchung im Jahr 2001 (U01), die in der 37. KW bis 44. KW stattfand, wurde die Trocknungshalle 1 mit anaerob stabilisiertem, mechanisch vorentwässertem Klärschlamm mit einem Trockenrückstand von 27,4 % in einer Schichthöhe von 25 cm befüllt. Um für die Befüllung der kompletten Halle ausreichend Klärschlamm zur Verfügung zu haben, wurde der zu trocknende Klärschlamm vor der Untersuchung in Containermulden zwischengestapelt. Das zu behandelnde Gesamtvolumen entsprach ca. 110 m³ (ca. 120 Mg). Während der Befüllung der Halle wurden die Abluftventilatoren gemäß der Betriebsanleitung des Herstellers manuell mit Maximalleistung (Modus „Lüften“) betrieben.

An insgesamt 19 Tagen wurden vom LfU Messungen und Probenahmen in der Trocknerabluft vorgenommen. In der 42. KW zeigte sich, dass sich eine ca. 10 cm dicke, stark verdichtete Schicht aus Klärschlamm (Pflugsohle) am Hallenboden aufgebaut hatte. Als Ursache hierfür stellten sich die um ca. 3 cm zu kurz ausgeführten Mischwerkzeuge der elektrischen Wendeeinrichtung heraus, die vom Hersteller bei einer vorausgegangenen Vergrößerung der Scheibenräder nicht angepasst worden waren. Der bodennahe Klärschlamm konnte daher von den Mischwerkzeugen nicht erfasst werden. Nachdem die Mischwerkzeuge am 25.10.2001 vom Hersteller durch passende ersetzt wurden, konnte im Höhenprofil des Klärschlammes keine Bodenschicht mehr festgestellt werden. Am Montag, den 05.11.2001, stellte das LfW weiter fest, dass ein in der Halle befindliches Strahlungsmessgerät mit einer dicken Staubschicht bedeckt war. Ursache hierfür war möglicherweise, dass sich die elektrische Wendeeinrichtung in einer Hallenecke festgefahren hatte und so der Klärschlamm lokal nur in einem Flächenbereich von wenigen Quadratmetern über einen längeren Zeitraum gewendet wurde. Der Klärschlamm war dort so trocken, dass dieser von den Umluftventilatoren aufgewirbelt wurde und so die Quelle für den am Messgerät festgestellten Staubniederschlag darstellte. Der Versuch musste aufgrund der Unregelmäßigkeiten im Anlagenbetrieb vorzeitig abgebrochen werden.

Mit der darauf folgenden Untersuchung wurde am 18. Februar 2002 (U02) begonnen. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich hierbei von der 8. KW bis zur 15. KW. Die Trocknungshalle 1 wurde zu Beginn erneut mit anaerob stabilisiertem, mechanisch vorentwässertem Klärschlamm (25,1 % TR), der in mehreren Containermulden mit einem Fassungsvermögen von ca. 10 Mg zwischengelagert war, befüllt. Die Schichthöhe war in der U02 mit 15 bis 20 cm um 10 bis 15 cm gegenüber der U01 vermindert. Das zu behandelnde Gesamtvolumen an Klärschlamm entsprach ca. 65 m³. Da der Wasseranteil des maschinell entwässerten Schlammes mit 75 % noch relativ hoch liegt, ist von einer Dichte um 1 kg/dm³ auszugehen. Die Füllmasse betrug daher ungefähr 65 Mg Klärschlamm. Während der Befüllung der Halle wurden auch in der U02 die Abluftventilatoren gemäß Betriebsanleitung des Herstellers manuell mit maximaler Leistung (Lüftungsmodus) betrieben.

Im Anschluss an die Schlammeinbringung wurde die elektrische Wendeeinrichtung in die Halle geschoben und mit der Stromversorgung verbunden (einfaches Zusammenstecken der Starkstromkontakte). Das ‚elektrische Schwein‘ wurde für ca. 2 Stunden manuell betrieben, um eine Vergleichmäßigung der Schichthöhe in der Halle zu erreichen.

Das Einbringen des Schlammes, die Verteilung und der Anschluss des ‚elektrischen Schweins‘ dauerte etwa eine Stunde. Zusätzlich wurde etwa eine Viertelstunde für die Reinigung des Vorplatzes benötigt, da dieser durch das Hin- und Herfahren der Fahrzeuge zwischen Lager- und Trocknungshalle mit Schlamm von den Reifen erheblich verschmutzt war.

Tab. 2: Überblick über Anlagenbetrieb und Ablauf des Untersuchungsprogramms an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen während der U01 und der U02

Parameter		Einheit	U01	U02
Untersuchung	Beginn	–	11.09.2001	18.02.2002
Untersuchung	Ende	–	06.11.2001	12.04.2002
Trocknungsdauer		d	57	53
Schichthöhe		cm	25-30	17
Dauer Hallenbefüllung		min	ca. 90	60
Abwärmenutzung BHKW		–	nein	nein
Masse	Beginn	Mg	118	65
Masse	Ende	Mg	57	21
Trockenrückstand	Beginn	%	27,8	25,1
Trockenrückstand	Ende	%	47,7	76,2
Glühverlust	Beginn	% _{mT}	55,7	61,3
Glühverlust	Ende	% _{mT}	52,5	58,6
∅ Temperatur innen ^{*)}		°C	14,2	9,0
∅ Temperatur außen ^{*)}		°C	10,7	4,8
∅ relative Luftfeuchte innen ^{*)}		%rH	84	77
∅ relative Luftfeuchte außen ^{*)}		%rH	88	78
∅ Sonneneinstrahlung innen ^{*)}		Wh/(m ² d)	1.156	2.047
		W/m ²	51	87
∅ Sonneneinstrahlung außen ^{*)}		Wh/(m ² d)	2.452	3.491
		W/m ²	108	148

^{*)} Datengrundlage: Betriebsaufzeichnungen der Uni Hohenheim; zeitliche Verläufe in der U01 und U02: vgl. Abb. 32 bis 37 (Anhang)

Nachdem ca. 2 Stunden später der Schlamm in der Halle etwas gleichmäßiger verteilt war, wurde anhand eines Querschnittsprofils eine im Mittel Schichthöhe von 17 cm ermittelt; die Temperatur des Schlammes betrug durchschnittlich 15 °C. Da jedoch die Temperaturmessungen infolge von Wärmenestern und die Schichthöhenmessungen infolge größerer Schlammklumpen relativ große Schwankungen aufwiesen, wurden diese Messungen am folgenden Tag wiederholt und diese Werte als Ausgangspunkt verwendet. Zur Festlegung der Ausgangswerte für die Schlammanalyse wurde eine Null-Probe entnommen. Hierzu wurde eine Mischprobe aus der gesamten Halle zusammengestellt, die in zwei dicht verschließbaren Glasgefäßen abgefüllt wurde. Eine Probe diente als Analysenprobe in den Labors des LfW zur Bestimmung der Schlammparameter; die andere wurde als Rückstellprobe bis zum Versuchsende im Kühlschrank aufbewahrt. Während des Versuchsablaufes wurden an insgesamt 19 Tagen Mischproben von Klärschlamm aus der Trocknungshalle entnommen und anschließend untersucht. Weitere Details zur Probenahme und zum Analysenumfang sind in Abschnitt 4 enthalten.

4 Untersuchungsprogramm, Messstellen und Probenahme

4.1 Mess- und Probenahmestellen

Im Anlagenschema (Abb. 3 in Abschn. 2.2) sind die Mess- und Probenahmestellen im Bereich der Trocknungshalle 1 eingezeichnet. Die Tab. 3 gibt darüber hinaus einen Einblick über sämtliche Mess- und Probenahmestellen mit den dort vorgenommenen Untersuchungen.

Tab. 3: Mess- und Probenahmestellen mit Untersuchungsumfang

Parameter	Einheit	P0	P1	P2	P3
Trockenrückstand TR	%	x	x		
Glühverlust GV	% _{mT}	x	x		
Brennwert	MJ/kg	x	x		
Heizwert	MJ/kg	x	x		
As, Be, <u>Fe</u> , <u>Pb</u> , <u>Cd</u> , <u>Cr</u> , Co, <u>Cu</u> , <u>Hg</u> , Mn, <u>Ni</u> , Sb, Se, Sn, Tl, V, <u>Zn</u>	mg/kg _{mT} ^{*)} , µg/m ³	x	x	x	
Phosphor gesamt	% _{mT}	x	x		
Stickstoff gesamt	% _{mT}	x	x		
Kohlenstoff gesamt	% _{mT}	x	x		
Wasserstoff gesamt	% _{mT}	x	x		
Sauerstoff	Vol.-%				x
Kohlenstoffdioxid	Vol.-%				x
Kohlenstoffmonoxid	mg/m ³				x
Schwefeldioxid	mg/m ³				x
Schwefeloxide	mg/m ³				x
Stickstoffmonoxid	mg/m ³				x
Stickstoffdioxid	mg/m ³				x
Ammoniak	mg/m ³				x
Chlorwasserstoff	mg/m ³				x
Fluorwasserstoff	mg/m ³				x
organische Stoffe (organischer Gesamtkohlenstoff)	mg/m ³				x
adsorbierbare organische Halogenkohlenwasserstoffe AOX	µg/kg _{mT}	x	x		
polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK	µg/kg _{mT} , µg/m ³		x	x	
polychlorierte Biphenyle PCB	µg/kg _{mT} , µg/m ³		x	x	
polychlorierte Dibenzodioxine und -furane PCDD/F	ng I-TE/kg _{mT} , ng I-TE/m ³		x	x	
polychlorierte Benzole PCBz	µg/kg _{mT} , µg/m ³		x	x	
polychlorierte Phenole PCPh	µg/kg _{mT} , µg/m ³		x	x	
Geruch	GE/m ³				x
Gesamtstaub	mg/m ³				x
Volumenstrom	m ³ /h				x
globale Strahlung	W/m ²				x
Luftfeuchte Trocknungshalle	%rH				x
Luftfeuchte Umgebung	%rH				x
Lufttemperatur Trocknungshalle	°C				x
Lufttemperatur Umgebung	°C				x
Luftgeschwindigkeit Umgebung	m/s				x
Temperatur Schlamm	°C				x
Schlammhöhe Trocknungshalle	cm				x
Oberflächentemperatur Schlamm	°C				x
Bodentemperatur Schlamm	°C				x
Laufzeit Ventilatoren Trocknungshalle	h				x
Laufzeit ‚elektrisches Schwein‘	h				x
Stromverbrauch Ventilatoren und Wendeeinrichtung	kWh				x

P0: Nassschlamm

P1: Klärschlamm aus der Trocknungshalle (entwässert (25 % TR) bis getrocknet (76 % TR))

P2: Abluft aus der Trocknungshalle

P3: Sonstige Prozessparameter

*) im Klärschlamm nur unterstrichene Metalle

Nassschlamm (Probenahmestelle P0):

Entnahmeort: vor der Zentrifuge

Anzahl der Einzelproben zur Tagesmischprobe: 3

Der Nassschlamm wurde jeweils am ersten Tag jeder Untersuchung (10.09.2001 bzw. 19.02.2002) entnommen.

Klärschlamm entwässert bis getrocknet (Probenahmestelle P1):

Entnahmeort: Trocknungshalle 1 der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage

Anzahl der Einzelproben zur Tagesmischprobe: 20 bis 25

Entnahme der Einzelproben: quer über die Bodenfläche der Halle und in unterschiedlichen Schichthöhen

Masse Tagesmischprobe: ca. 10 kg

An insgesamt 19 Tagen wurden dem Klärschlammhaufwerk in der Trocknungshalle 1 jeweils 20 bis 25 Einzelproben quer verteilt über die Gesamtfläche und in unterschiedlichen Schichttiefe entnommen und diese zu einer Sammelprobe vereinigt. Nach intensiver Homogenisierung der Sammelprobe erfolgte die Entnahme der Mischprobe für die Laboruntersuchungen. Neben der Mischprobe wurden an – im Vergleich zur restlichen Klärschlammfläche – augenscheinlich auffälligen Bereichen, wie unmittelbar unter den Deckenventilatoren sowie an den Rändern zusätzlich Einzelproben für die Analytik entnommen. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass bei der Entnahme der Einzelproben möglichst keine Störstoffe wie Haare, Kunststoffteilchen o.ä. mit entnommen wurden. Von den homogenisierten Mischproben bzw. Einzelproben wurden Aliquote für die Untersuchungen im Betriebslabor der Kläranlage und die Untersuchungen in den Laboratorien des LfW in Probenahmegefäße aus Glas abgefüllt und luftdicht verschlossen.

Abluft (Probenahmestelle P2):

Zur Quantifizierung der Emissionen ist es erforderlich, dass die Abluft in einem definierten Kanal an die Umgebung abgeführt wird (geführte Emissionsquelle). Bauseitig sind in jeder Stirnwand der vier Trocknungshallen zwei simultan laufende Abluftventilatoren integriert (vgl. Abschn. 2.2), die die Hallenabluft ungeführt in die Umgebung ausblasen. Zur Durchführung von Abluftmessung war es daher erforderlich, unmittelbar an die beiden Abluftventilatoren an der für den Versuch bestimmten Trocknungshalle zwei Abluftkanäle aus verzinkten Stahlblechrohren anzubringen. Ein Abluftkanal wurde mit mehreren Messstutzen ausgestattet und diente als Messstelle für die Schadstoffmessungen. Der zweite Abluftkanal wurde ohne Messöffnungen ausgeführt und diente ausschließlich dazu, in der Halle symmetrische Strömungsverhältnisse sicherzustellen. Die Arbeiten wurden vom Betreiber der Anlage nach den Vorgaben des LfU ausgeführt. Für die Aufstellung der Probenahme- und Messgerätschaften wurde vom Anlagenbetreiber eine stabile Messbühne errichtet und seitlich mit Planen sowie mit einer Überdachung ausgestattet, um unabhängig von den Witterungseinflüssen zu sein.

Die Abb. 5 der Abluftmessstelle (Draufsicht) zeigt die Anordnung und die Anzahl der Probenahme- und Messstutzen sowie die Ein- und Auslaufstrecken (vor dem ersten bzw. nach dem letzten Messstutzen) am Messkanal.

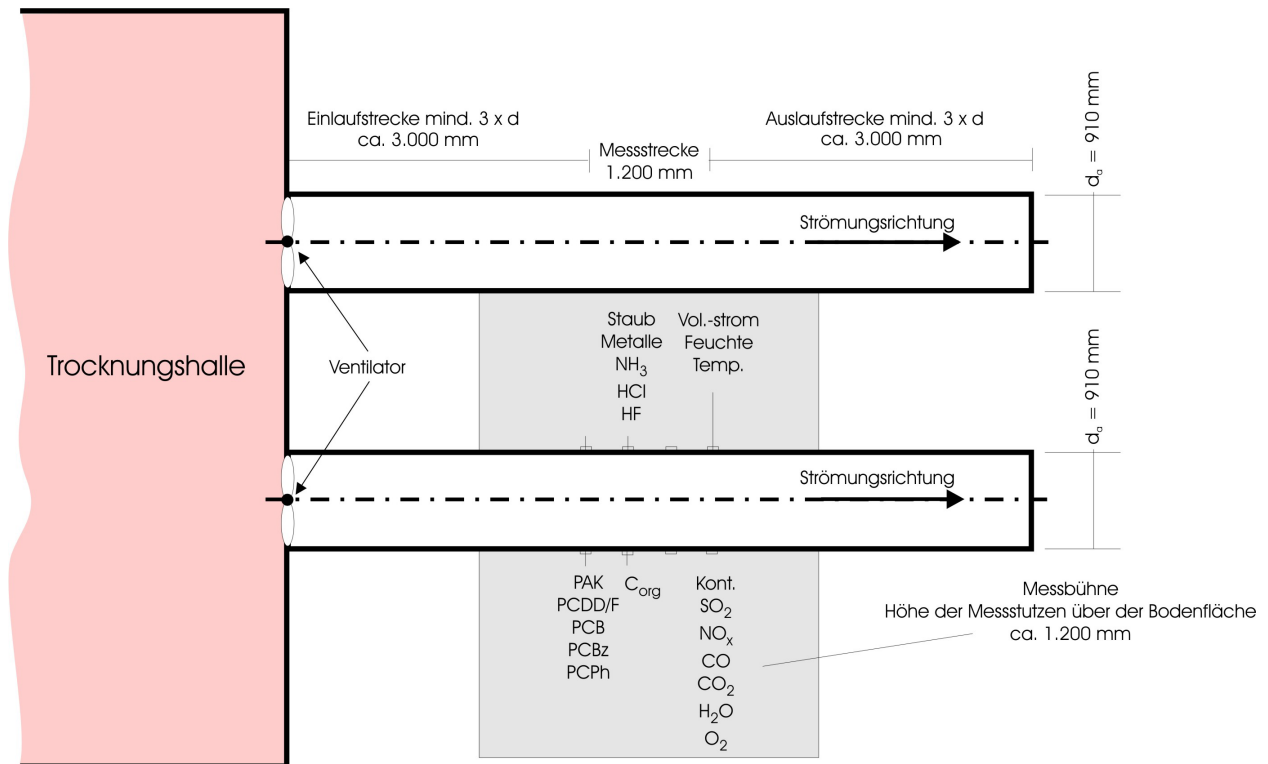


Abb. 5: Schematische Darstellung (Draufsicht) der Abluftführung der Trocknungshalle 1 der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage mit Lage und Abmessungen der Abluftmessstellen

Strömungsrichtung	horizontal
Kanalgeometrie	rund
Kanalquerschnitt	0,63 m ² (d _i = 0,90 m)
Durchmesser hydr.	0,90 m
Einlaufstrecke	3 m (davor Abluftventilator in Außenwand der Trocknungshalle 1)
Auslaufstrecke	3 m (danach freier Austritt in die Umgebung)

Zur Arretierung der Probenahmesonden waren am Abluftrohr Stutzen mit 3"-Innengewinde im 90°-Winkel an das Abluftrohr in der Rohrmitte installiert. Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Messstutzen betrug etwa 400 mm. Für die zeitgleiche Bestimmung mehrerer Schadstoffkomponenten wurden an insgesamt 6 Messstutzen simultan Messungen und Probenahmen durchgeführt. Die Abluftmessstelle (P2) entsprach damit den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (Ein- und Auslaufstrecke mit mindestens dreifachem hydraulischen Durchmesser des Kanalquerschnitts).

Die Konzentrationen an Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, organischem Gesamtkohlenstoff wurden kontinuierlich gemessen. Zur Bestimmung der Gehalte an Schwefeloxiden, Ammoniak, Chlor- und Fluorwasserstoff, Metallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, polychlorierten Benzolen, polychlorierten Biphenylen, polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen sowie polychlorierten Benzolen und polychlorierten Phenolen wurde die Abluft isokinetisch abgesaugt und die gezogenen Proben analysiert.

Zur Ermittlung der Geruchsstoffkonzentration wurden von der Universität Hohenheim jeweils am ersten Untersuchungstag aus dem Abluftkanal bei stehendem (freie Konvektion) sowie bei laufenden Abluftventilatoren (erzwungene Konvektion) Abluftproben für eine nachfolgende olfaktometrische Untersuchung entnommen.

Die Ermittlung der Gesamtstaubgehalte erfolgte simultan zu den Abluftabsaugungen, die zur Bestimmung der gasförmigen bzw. filtergängigen Abluftbestandteile Ammoniak, Chlor-, Fluorwasserstoff, Metalle und Schwefeloxide durchgeführt wurden. Zur Bestimmung der sehr geringen Staubgehalte war es notwendig, den Staub täglich über den gesamten Probenahmezeitraum (insgesamt mehrere Stunden) auf einem Planfilter anzureichern und anschließend die abgeschiedene Staubmasse gravimetrisch zu bestimmen. Ergänzend zu den Probenahmen über den mehrwöchigen Trocknungsprozess wurde eine Einzelstaubprobenahme über den Zeitraum der Hallenräumung durchgeführt.

Der Volumenstrom der Abluft wurde kontinuierlich über den Untersuchungszeitraum durch Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Flügelradanemometer, der Ablufttemperatur mit einem NiCr-Ni-Thermoelement und der Abluftfeuchte mit einem hygrometrischen Feuchtefühler in einem Abluftkanal bestimmt. Der Gesamtvolumenstrom aus der Trocknungshalle wurde durch Multiplikation des aus den Messungen am Abluftkanal ermittelten Volumenstroms mit dem Faktor 2 (2 Abluftventilatoren je Halle) berechnet.

Sonstige Parameter (Probenahmestellen P3):

Um ein genaues Bild der am Trocknungsstandort vorhandenen nutzbaren solaren Einstrahlung zu erhalten, das auch die Verluste durch Reflexionen an der transparenten Hülle der Trocknungshalle enthält, wurde im Halleninneren eine Messung der dort wirksamen Globalstrahlung durchgeführt. Hierzu wurde 2 m über dem Boden ein Pyranometer aufgestellt und mit diesem die Einstrahlung in W/m^2 gemessen. Daneben wurde die Globalstrahlung außerhalb der Halle mit einem weiteren Pyranometer kontinuierlich erfasst.

Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit und der -temperatur erfolgte im Halleninneren sowie in der Außenluft mit kapazitiven Feuchtesensoren bzw. Pt-100 Widerstandsthermometern. Von einem Datenlogger wurden die Messwerte in einem Zyklus von 5 Minuten erfasst und daraus die Stundenmittelwerte berechnet.

Die Messung der Oberflächentemperatur des Klärschlammes erfolgte bei jeder Begehung mit einem Infrarotthermometer an mehreren Stellen. Aus den Einzelmesswerten wurde pro Begehung ein Mittelwert errechnet. Zur Messung der Schlammbodentemperatur wurde ein NiCr-Ni-Thermoelement eingesetzt.

Die Laufzeiten der Ventilatoren und des ‚elektrischen Schweins‘ wurden über die Prozesssteuerung im 2-Sekunden-Takt erfasst und daraus Stundenmittelwerte gebildet.

4.2 Analysen- und Messverfahren

4.2.1 Klärschlamm

Trockenrückstand. Bestimmung aus der Originalsubstanz in Anlehnung an DIN-Vorschrift 38 414 Teil 2 (DEV S2) durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C.

Glühverlust. Bestimmung aus dem Trockenrückstand nach DIN-Vorschrift 38 414 Teil 3 (DEV S3) durch Glühen bis zur Gewichtskonstanz bei 550 °C.

Kapillare Saugzeit. Bestimmung aus der Originalsubstanz in einer CST-Apparatur mit elektronischer Messzelle.

Brenn-, Heizwert. Bestimmung aus dem Trockenrückstand nach adiabatischer Methode in einem Verbrennungskalorimeter in Anlehnung an DIN 51 900.

Metalle. Mikrowellenaufschluss analog DIN 38 414 Teil 7 (DEV S7), Bestimmung mittels Atomemissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) bzw. mit Atomabsorptionsspektrometer (AAS).

Gesamtkohlen-, -stick- und -wasserstoff. Bestimmung mit Kohlenstoff/Wasserstoff/Stickstoff-Analysator LECO in Anlehnung an Normentwurf CEN/TC 292 vom April 1997.

Gesamtphosphor. Bestimmung nach DIN 38 405 Teil 11 (DEV D11).

Adsorbierbare organische Halogene (AOX). Bestimmung nach DIN 38 414 Teil 18 (DEV S18).

Polychlorierte Benzole (PCBz). Extraktion mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mit Gaschromatographen der Fa. Varian GmbH, Darmstadt, mit massenspektrometrischem Detektor Trio 1000 (HRGC/MSD) der Fa. Fisons Instruments GmbH, Mainz.

Polychlorierte Biphenyle (PCB). Extraktion mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mittels Gaschromatographen HP 5890 Series II mit Elektroneneinfangdetektor HP G1223A (HRGC/ECD) der Fa. Hewlett-Packard GmbH, Waldbronn.

Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F). Extraktion mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung im Gaschromatographen Agilent 6890 der Fa. Agilent Technologies Deutschland GmbH, Waldbronn, mit Autosampler 7683 KAS 4 Plus Injektionssystem der Fa. Gerstel GmbH Co. KG, Mühlheim an der Ruhr, gekoppelt an Sektrofeldmassenspektrometer MAT 95XL der Fa. Thermo Finnigan MAT GmbH, Bremen, in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 2 und 3.

Polychlorierte Phenole (PCPh). Extraktion mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mit Gaschromatographen HP 5890 Series II der Fa. Hewlett-Packard GmbH, Waldbronn, mit massenspektrometrischem Detektor Trio 2000 (HRGC/MSD) der Fa. Fisons Instruments GmbH, Mainz.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Extraktion mit Cyclohexan; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mit Gaschromatographen der Fa. Agilent 6890 Series mit massenspektrometrischem Detektor Agilent 597 (HRGC/MSD) der Fa. Agilent Technologies Deutschland GmbH, Waldbronn, in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3872 Blatt 1.

4.2.2 Abluft

Kontinuierliche Messverfahren:

Zur kontinuierlichen Bestimmung der Feuchte, Temperatur sowie der Abluftkomponenten Kohlenstoffmon- und -dioxid, Sauerstoff, Schwefeldioxid, Stickstoffmon- und -dioxid in der Abluft wurde ein tragbarer Gasanalysator testo 360/1 der Fa. Testo GmbH & Co., Lenzkirch, eingesetzt:

Zur Erfassung der Ablufttemperatur dient ein NiCr-Ni-Thermoelement im Inneren eines Sondenrohrs. Die Entnahme des Messgases erfolgt über eine beheizte Probenahmesonde mit Keramikvorfilter zur Oberflächenabscheidung von Staubpartikeln. Über einen beheizten Probenahmeschlauch wird die entstaubte Abluft dem Analysator zugeführt. Die Abluft passiert zunächst eine auf 700 °C beheizte Zirkondioxid-Sonde zur Ermittlung des Sauerstoffgehalts in der feuchten Abluft. Im Analysator wird die Abluft daraufhin in einem Peltierkühler auf 2 °C abgekühlt und anschließend einem zweiten Sauerstoffsensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts der trockenen Abluft sowie den weiteren Gassensoren zugeführt. Die Abluftfeuchte wird aus dem "feuchten" und "trockenen" Sauerstoffgehalt berechnet. Zur Konzentrationsbestimmung werden im Analysator Dreielektrodensensoren für die Abluftkomponenten Kohlenstoffmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxide, ein Zweielektrodensensor für Sauerstoff und ein Infrarot-Sensormodul für Kohlenstoffdioxid eingesetzt. Die aktuellen Konzentrationswerte werden alle 30 s über eine serielle Schnittstelle an einen Messwerterfassungsrechner übertragen und auf einem Datenträger gesichert.

Zur kontinuierlichen Bestimmung der Abluftkomponenten Kohlenstoffmon- und -dioxid, Stickstoffmon- und -dioxid, Sauerstoff, Schwefeldioxid sowie des organischen Gesamtkohlenstoffs wurde das im Messwagen des LfU installierte Gasentnahme- und -analysensystem eingesetzt:

Die Entnahme des Messgases erfolgt hierbei über eine beheizte Edelstahlsonde mit außenliegendem beheizten Quarzwattfilter. Das Messgas wird mit einer beheizten Doppelkopfmembranpumpe über einen 60 m langen, auf 190 °C beheizten Messgasschlauch in den Messwagen abgezogen und zu einem gleichfalls auf 190 °C beheizten Messgasverteiler geführt. Vom Messgasverteiler wird das Messgas direkt über eine beheizte Probengasleitung einem Flammenionisationsdetektor zur Bestimmung des organischen Gesamtkohlenstoff-Gehalts zugeführt. Für die Bestimmung der restlichen Komponenten wird das Messgas aufbereitet. Die Aufbereitung besteht aus einem Messgaskühler Advance SCC der Fa. ABB Automation Products GmbH, Frankfurt, mit integrierter Säuredosierung (Zudosierung von 3 %iger Phosphorsäure zum Messgas). Das kalte, trockene Messgas wird anschließend den verschiedenen Gasanalysatoren zugeführt.

Die Gaskomponenten werden im aufbereiteten Messgas nach folgenden Verfahren bestimmt:

Kohlenstoffmon- und -dioxid. Mit NDIR-Photometer URAS 10E der Fa. Hartmann & Braun AG, Frankfurt.

Sauerstoff. Paramagnetisch mit OXYNOS 100 der Fa. Fisher-Rosemount GmbH, Weßling.

Schwefeldioxid. Mit NDUV-Photometer RADAS 2 der Fa. Hartmann & Braun AG, Frankfurt.

Stickstoffmon- und -dioxid. Mit Chemilumineszenzdetektor CLD 700 EL der Fa. Eco Physics GmbH, München.

Distickstoffmonoxid. Mit NDIR-Photometer URAS 14 der Fa. ABB Automation Products GmbH, Frankfurt.

Organischer Gesamtkohlenstoff. Heißgasmessung mit Flammenionisationsdetektor FID 123 der Fa. Testa GmbH, München.

Ein mit den Gasanalysatoren verbundenes Messwerterfassungssystem registriert alle 30 s die aktuellen Messwerte.

Diskontinuierliche Messverfahren:

Die diskontinuierlichen Messungen zur Bestimmung der relevanten **anorganischen Komponenten** in der Gasphase erfolgten durch nasschemische Absaugungen.

Für die isokinetische Abluftmessung wird das zu analysierende Gas über eine beheizte Nulldrucksonde aus Titan mit Quarzfaserplanfilter (In-Stack-Anordnung) der Fa. Paul Gothe GmbH, Bochum, entnommen und über zwei Impingerflaschen mit jeweils 70 ml Absorptionsflüssigkeit und einer weiteren Impingerflasche als Tropfenabscheider mit Hilfe einer Kohlschieberpumpe abgesaugt (Bestimmung des Gesamtstaubgehalts und der filtergängigen Schadstoffanteile). Das durch die Absorptionsflüssigkeit gesaugte Gasvolumen wird in einem Trockenturm mit Silicagel getrocknet und mit einer Trockengasuhr bestimmt. Zur Umrechnung des Messgasvolumens auf die Normbedingungen werden der Umgebungsdruck und die Ablufttemperatur gemessen.

Die Bestimmung der Abluftparameter und -komponenten erfolgte durch die nachfolgend beschriebenen Probenahme- und Analyseverfahren:

Ammoniak. Probenahme durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml 0,1 n Schwefelsäure) in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2461 Blatt 2; photometrische Bestimmung der Ammonium-Ionen-Konzentration mit Spektralphotometer CADAS 50 S der Fa. Dr. Lange GmbH, Düsseldorf, in Anlehnung an DIN-Vorschrift 38 406 Teil 1.

Chlorwasserstoff. Probenahme durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml deionisiertem Wasser) in Anlehnung an DIN-Vorschrift prEN 1911 Teil 1 und 2 (Entwurf); ionenchromatographische Bestimmung der Chlorid-Ionen mit Ionenchromatograph der Fa. Dionex GmbH, Idstein, in Anlehnung an DIN-Vorschrift prEN 1911 Teil 3 (Entwurf).

Feuchte. Gravimetrische Bestimmung durch Kondensation des Wasserdampfes bei 4 °C in gekühlten Impingerflaschen.

Fluorwasserstoff. Probenahme durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml deionisiertem Wasser) in Anlehnung an DIN-Vorschrift prEN 1911 Teil 1 und 2 (Entwurf); potenziometrische Bestimmung der Fluorid-Ionen mit fluoridionensensitiver Elektrodenkette Expandable ionAnalyzer EA 920 der Fa. Orion Research Inc., Cambridge (UK), in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2470 Blatt 1 (Verfahren B).

Geruch. Probenahme in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3881 Blatt 2 und Blatt 4. Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration durch dynamische Olfaktometrie nach prEN 13725 (Entwurf) mit Olfaktometer TO7 der Fa. Ecoma GmbH, Honigsee.

Gesamtstaub. Gravimetrische Bestimmung in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2066 Blatt 7 in der Abluft (Planfilterkopfgerät mit Quarzfaserplanfilter).

Quecksilber. Probenahme durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml 0,5 %iger Kaliumdichromat-Lösung in 10 %iger Salpetersäure); Bestimmung durch Reduktion mit 10 %iger Zinn(II)chloridlösung und flammenlose Atomabsorptionsspektrometrie (Kalt-dampftechnik) mit Quecksilber-Analysator Hg-254 N der Fa. Seefelder Messtechnik GmbH & Co. KG, Seefeld, in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3868 Blatt 2 (Entwurf).

Schwefeloxide. Probenahme durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml 3 %iger Wasserstoffperoxid-Lösung) in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2462 Blatt 8; nephelometrische Bestimmung der Sulfat-Ionen mit Spektralphotometer CADAS 50 S der Fa. Dr. Lange GmbH, Düsseldorf, nach Fällung des Sulfats als Bariumsulfat.

Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Selen, Tellur, Thallium, Vanadium, Zinn. Probenahme der filtergängigen Schwermetalle durch nasschemische Anreicherung (zwei Impingerflaschen mit je 70 ml 3 %iger Wasserstoffperoxid-Lösung in

5 %iger Salpetersäure) in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3868 Blatt 2 (Entwurf). Die Ermittlung der staubgebundenen Schwermetalle erfolgte durch Königswasseraufschluss der Staubproben nach der Gesamtstaub-Bestimmung. Die Analyse der Metallgehalte in den Absorptions- bzw. Aufschlusslösungen erfolgte durch Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) mit Massenspektrometer Elan 6000 der Fa. Perkin Elmer Sciex, Toronto.

Die diskontinuierlichen Messungen zur Bestimmung der relevanten **organischen Komponenten** erfolgten durch isokinetische Absaugungen des zu analysierenden Gases über eine Quarzglassonde. Der Entnahmesonde sind ein außenliegendes, beheiztes Quarzwattfilter zur Staubabscheidung, ein Intensivkühler zur Abscheidung kondensierbarer Gasbestandteile, ein Tropfenfänger, ein Planfilter zur Aerosolabscheidung sowie geeignete Ab- oder Adsorptionsmedien zur zusätzlichen Anreicherung der jeweiligen zu bestimmenden Stoffe nachgeschaltet. Das abgesaugte Messgas wird mit Hilfe eines mit Silicagel gefüllten Adsorbers getrocknet und über eine regulierbare, gasdichte Vakuumpumpe zur Bestimmung des abgesaugten Messgasvolumens in zwei Trockengasuhren geleitet.

Die Bestimmung der relevanten Komponenten erfolgte durch die nachfolgend beschriebenen Probenahme- und Analyseverfahren:

Polychlorierte Benzole (PCBz). Nasschemische und adsorptive Anreicherung {zwei Impingerwaschflaschen (zwischen Intensivkühler und Tropfenfänger) mit Diethylenglykol, eine Feststoffkartusche (nach Planfilter) mit XAD-2-Harz} in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 1; Extraktion der Filter, des Kondensats und des Ab- und Adsorptionsmittels mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mittels Gaschromatographen der Fa. Varian GmbH, Darmstadt, mit massenspektrometrischem Detektor Trio 1000 (HRGC/MSD) der Fa. Fisons Instruments GmbH, Mainz.

Polychlorierte Biphenyle (PCB). Nasschemische und adsorptive Anreicherung {zwei Impingerwaschflaschen (zwischen Intensivkühler und Tropfenfänger) mit Diethylenglykol, eine Feststoffkartusche (nach Planfilter) mit XAD-2-Harz} in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 1; Extraktion der Filter, des Kondensats und des Ab- und Adsorptionsmittels mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mittels Gaschromatographen HP 5890 Series II mit Elektroneneinfangdetektor HP G1223A (HRGC/ECD) der Fa. Hewlett-Packard GmbH, Waldbronn.

Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F). Nasschemische und adsorptive Anreicherung {zwei Impingerwaschflaschen (zwischen Intensivkühler und Tropfenfänger) mit Diethylenglykol, eine Feststoffkartusche (nach Planfilter) mit XAD-2-Harz} in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 1; Extraktion der Filter, des Kondensats und des Ab- und Adsorptionsmittels mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung im Gaschromatographen Agilent 6890 der Fa. Agilent Technologies Deutschland GmbH, Waldbronn, mit Autosampler 7683 KAS 4 Plus Injektionssystem der Fa. Gerstel GmbH Co. KG, Mühlheim an der Ruhr, gekoppelt an Sektrofeldmassenspektrometer MAT 95XL der Fa. Thermo Finnigan MAT GmbH, Bremen, in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 2 und 3.

Polychlorierte Phenole (PCPh). Nasschemische und adsorptive Anreicherung {zwei Impingerwaschflaschen (zwischen Intensivkühler und Tropfenfänger) mit Diethylenglykol, eine Feststoffkartusche (nach Planfilter) mit XAD-2-Harz} in Anlehnung an DIN-Vorschrift EN 1948 Teil 1; Extraktion der Filter, des Kondensats und des Ab- und Adsorptionsmittels mit Toluol; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mittels Gaschromatographen HP 5890 Series II der Fa. Hewlett-Packard GmbH, Waldbronn, mit massenspektrometrischem Detektor Trio 2000 (HRGC/MSD) der Fa. Fisons Instruments GmbH, Mainz.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Adsorptive Anreicherung {zwei Feststoffkartuschen (nach Planfilter) mit XAD-2-Harz}; Extraktion der Filter, des Kondensats und des Adsorptionsmittels mit Cyclohexan; säulenchromatographische Aufarbeitung des Extrakts; Bestimmung mit Gaschromatographen Fa. Agilent 6890 Series mit massenspektrometrischem Detektor Agilent 597 (HRGC/MSD) der Fa. Agilent, Waldbronn, in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3872 Blatt 1.

Weitere Abluftparameter:

Die Berechnung des **Abluftvolumenstroms** erfolgte aus der Aufzeichnung der Strömungsgeschwindigkeit der Abluft an einem Abluftkanal (Bestimmung der mittleren Abluftgeschwindigkeit nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1). Die Geschwindigkeit wurden mit Hilfe eines Flügelradanemometers und einem Messdatenerfassungsgerät Almemo 2290-8 der Fa. Ahlborn, Holzkirchen, bestimmt. Unter Einbeziehung der Temperatur, des Umgebungsdrucks und des statischen Drucks im Strömungskanal, die kontinuierlich mit einem NiCr-Ni-Thermoelement bzw. einem temperaturkompensierten Präzisions-Druckaufnehmer erfasst wurden, sowie der kontinuierlichen mit einem Fühler gemessenen relativen Abluftfeuchte wurde der Volumenstrom normiert.

Die gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen sind als Chlorwasserstoff, die gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen als Fluorwasserstoff, die Schwefeloxide als Schwefeldioxid, die Stickstoffoxide als Stickstoffdioxid und die organischen Stoffe als organischer Gesamtkohlenstoff angegeben.

Sämtliche im Bericht dargestellte Messwerte sind auf trockene Abluft unter Normbedingungen (273,15 K, 1.013,25 hPa) bezogen.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Maschinelle Schlammentwässerung

Zur maschinellen Entwässerung wird eine Hochleistungszentrifuge der Firma KHD Humboldt verwendet. Bevor der Nassschlamm die Zentrifuge erreicht, wird dieser zur Verbesserung der Entwässerungsfähigkeit mit einem Flockungshilfsmittel (organisches Polymer) versetzt.

Die Zentrifuge läuft mit etwa 3.000 Umdrehungen pro Minute bei einer Steuerfrequenz von ca. 40 Hz und entwässert den Nassschlamm mit einem Trockenrückstand von etwa 3 % auf etwa 30 %. Bei der maximalen Leistung der Zentrifuge bei 45 Hz kann ein Trockenrückstand von ca. 33 % erreicht werden. Die maximale Durchsatzmenge beträgt 20 m³ Nassschlamm pro Stunde. Das Zentrifugat wird der Kläranlage wieder zugeführt und der entwässerte Schlamm über ein Förderband in Containermulden abgeworfen. Der maschinell entwässerte Schlamm wird mit einem Lkw zur weiteren Behandlung in die solare Klärschlamm-trocknungsanlage gebracht.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Nassschlammes und des maschinell entwässerten Schlammes sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Der Nassschlamm hatte in der U01 vor der Konditionierung und Entwässerung einen Trockenrückstand von 2,9 % und nach der Zentrifuge vor Einbringung in die Trocknungshalle von 27,8 %. In der U02 lag der Trockenrückstand des Nassschlammes bei 2,7 % und des entwässerten Schlammes bei 25,1 %. In Anbetracht der zur Verfügung stehenden Hochleistungszentrifuge, mit der auch Trockenrückstände von über 30 % zu erreichen sind, sind diese Entwässerungsgrade nicht sehr hoch.

Mit einer besseren Nutzung des Entwässerungspotenzials der Zentrifuge könnte aufgrund eines höheren Trockenrückstands des entwässerten Klärschlammes der Zeitraum der Trocknung in der solaren Trocknungsanlage um einige Tage verringert oder der hierfür erforderliche Platzbedarf reduziert werden. Dagegen spricht, dass bei einer ausreichenden Behandlungskapazität in der Trocknungsanlage für den Wasserentzug weniger elektrische Energie als bei der Zentrifuge aufgewendet werden muss (vgl. Abschn. 5.2.3). Dieser Aspekt kann z.B. in den Sommermonaten, in denen die Trocknung in der Regel schneller vonstatten geht, vom Anlagenbetreiber zur Einsparung elektrischer Energie genutzt werden.

Aus den Glühverlusten der Trockenmasse des Nassschlammes und des entwässerten Schlammes folgt für die U01 eine geringfügige Abnahme der organischen Substanz und für die U02 ein gleichbleibender Gehalt. Mit einem Glühverlust von 59,0 %_{mT} in der U01 und von 61,4 %_{mT} in der U02 ist der Nassschlamm an der Kläranlage des AZV Füssen jedoch relativ schlecht stabilisiert. Durch eine weitergehende Optimierung des anaeroben Behandlungsprozesses hin zu einem höheren

Tab. 4: Übersicht über physikalisch-chemische Parameter und Elementarzusammensetzung des Klärschlammes: (P0: Nassschlamm; P1: maschinell entwässertes Schlamm) während der U01 und U02; n.b.: nicht bestimmt

Parameter	Einheit	U01		U02	
		P0	P1	P0	P1
Trockenrückstand	%	2,9	27,8	2,7	25,1
Glühverlust	% _{mT}	59,0	55,7	61,4	61,3
Kapillare Saugzeit CST	s	n.b.	n.b.	140	n.b.
Kohlenstoff	% _{mT}	30,3	29,6	32,2	32,7
Wasserstoff	% _{mT}	4,1	4,1	4,5	4,5
Stickstoff	% _{mT}	3,5	3,4	4,3	4,1
Brennwert	MJ/kg	0,35	n.b.	0,36	3,40
Heizwert	MJ/kg	- 2,05	n.b.	- 2,05	1,33

Stabilisierungsgrad des Nassschlammes könnte die Faulgasausbeute im Hinblick auf die nachfolgende Verwertung des Faulgases im BHKW verbessert und damit die Energieausbeute erhöht werden.

Trotz des relativ schlechten Stabilisierungsgrads ist der Schlamm gut entwässerbar, wie die im vorgegebenen TR-Bereich geringe kapillare Saugzeit von 149 s zeigt. Nassschlamm gilt im Allgemeinen bei einer kapillaren Saugzeit kleiner 200 s im betrachteten TR-Bereich als gut entwässerbar [1].

Die Elementaranalyse des Nassschlammes ergab in der U02 für Kohlenstoff einen durchschnittlichen Gehalt von 32,2 %_{mT}, Wasserstoff von 4,5 %_{mT} und Stickstoff von 4,3 %_{mT}. Der Kohlenstoffgehalt ist mit 32,2 %_{mT} noch relativ hoch. Dieses Ergebnis erscheint insofern plausibel, da der Nassschlamm mit einem Glühverlust von 61,4 %_{mT} nur mäßig stabilisiert ist. Der Stickstoffgehalt des Nassschlammes betrug in der U02 4,3 %_{mT}. Vergleicht man diesen Wert mit dem Stickstoffgehalt des entwässerten Klärschlammes zu Trocknungsbeginn (4,1 %_{mT}), so ergibt sich eine geringfügige Stickstoffabnahme. Verantwortlich für die Stickstoffabnahme können im Zentrifugat gelöste Stickstoffverbindungen oder aber die Verflüchtigung leichtflüchtiger Stickstoffverbindungen aus dem Klärschlamm (z.B. Ammoniak) im Zeitraum der Lagerung zwischen der Entwässerung und der Trocknung sein (vgl. hierzu Abschn. 5.2.2.1.6).

Der Heizwert des Nassschlammes ist aufgrund des sehr hohen Wassergehalts von über 97 % in der U01 und U02 negativ (- 2,05 MJ/kg); d.h. der Nassschlamm könnte nur unter Energiezufuhr thermisch behandelt werden. Mit der maschinellen Entwässerung des Nassschlammes nimmt der Wassergehalt im entwässerten Klärschlamm in der U01 auf 72 %, in der U02 auf 75 % ab und der Heizwert steigt auf 1,33 MJ/kg (U02); damit liegt er um ca. den Faktor 6 unterhalb des Bereichs einer selbstgängigen Verbrennung.

5.2 Solare Trocknung

5.2.1 Klärschlamm-eigenschaften, -zusammensetzung

5.2.1.1 Physikalisch-chemische Parameter, Elementarzusammensetzung

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der chemisch-physikalischen Grobcharakterisierung der Klärschlämme im zeitlichen Verlauf der U02 dargestellt. Neben den physikalischen Parametern Trockenrückstand, Glühverlust, Heiz- und Brennwert wurden die Klärschlämme auf ihre elementare Zusammensetzung bezüglich Kohlen-, Wasser- und Stickstoff untersucht.

Trockenrückstand

In Abb. 6 ist die Entwicklung des Trockenrückstands des Klärschlammes während der U02 grafisch dargestellt. Ergänzend zum Trockenrückstand der Klärschlammproben über der Haufwerksfläche sind die Trockenrückstände für zwei besonders auffällige Bereiche in der Trocknungshalle aufgeführt. Zum einen wurde der durch farbliche Unterschiede und durch die geringere Schütthöhe auffallende Klärschlamm im Bereich unterhalb der Umluftventilatoren und zum anderen der Klärschlamm im Eckbereich am Ende der Trocknungshalle (Abluftaustritt), der insbesondere durch die unterschiedliche Konsistenz und Struktur ins Auge fiel, untersucht. Mit der Untersuchung des Klärschlammes an diesen Stellen wurde erst bei ihrem erkennbaren Auftreten begonnen, so dass erst ab diesem Zeitpunkt Ergebnisse vorliegen.

Der Trockenrückstand des Klärschlammes erhöht sich in der U02 sukzessive von anfänglich durchschnittlich 25,1 % auf 76,2 % zum Ende der Untersuchung. Insgesamt wurde für die Trocknung des

Klärschlamm ein Zeitraum von 53 Tagen benötigt. Wie zu erwarten, schreitet die Trocknung an schönen, sonnigen Tagen rascher und bei gemischten Witterungsverhältnissen mit wechselnder Bewölkung und noch feuchtigkeitsungesättigter Umgebungsluft langsamer voran; an Regentagen mit starker Bewölkung und feuchtigkeitsgesättigter Umgebungsluft, wie es zu Beginn der U02 der Fall war, stagniert hingegen der Trocknungsprozess völlig.

In den ersten drei Wochen der U02 nimmt der durchschnittliche Trockenrückstand des Klärschlammes nur geringfügig von 25,1 % auf etwa 35 % zu. Danach ist ein steilerer Anstieg der Trockenrückstandskurve – insbesondere gegen Ende der Untersuchung – gegeben. Aus dem Verlauf der Trockenrückstandskurve könnte man auf den ersten Blick eine höhere Verdunstungsleistung zum Ende der Untersuchung hin vermuten. Dies ist jedoch nicht der Fall, da der Anstieg der Trockenrückstandskurve nicht nur von der Masse des verdunsteten, sondern auch von der Masse des im Klärschlamm enthaltenen Wassers abhängt (resultiert aus der Definition des Trockenrückstands als Quotient aus Trockenmasse durch Schlammmasse). Ist z.B. noch viel Wasser – wie am Anfang der Untersuchung – im Klärschlamm enthalten, muss mehr Wasser verdunstet werden, um einen Anstieg des Trockenrückstands um einen definierten Betrag zu bewirken.

Für den Bereich unter den Deckenventilatoren (Fläche mit einem Durchmesser von ca. 5 m) ergibt sich ein wesentlich höherer Trockenrückstand. Hier ist ein rascherer Trocknungsfortschritt als in den übrigen Bereichen der Trocknungshalle (Unterschied zum Hallendurchschnitt ~ 10 %) festzustellen. So betrug der Trockenrückstand im Klärschlamm unter den Umluftventilatoren am Ende der Untersuchung bereits 88 %.

In den hinteren Eckbereichen zeigt sich hingegen eine Verzögerung des Trocknungsprozesses. Bei der Leerung der Halle hatte der Klärschlamm dort nur einen Trockenrückstand von ~ 59 %; der Trockenrückstand war damit im Vergleich zum Durchschnittsgehalt am Untersuchungsende (76,2 %) um durchschnittlich mehr als 15 % geringer. Verantwortlich für die geringere Trocknung des Klärschlammes in den hinteren Eckbereichen ist vermutlich eine durch den Absaugeffekt der Abluftventilatoren verursachte Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten über der Schlammoberfläche.

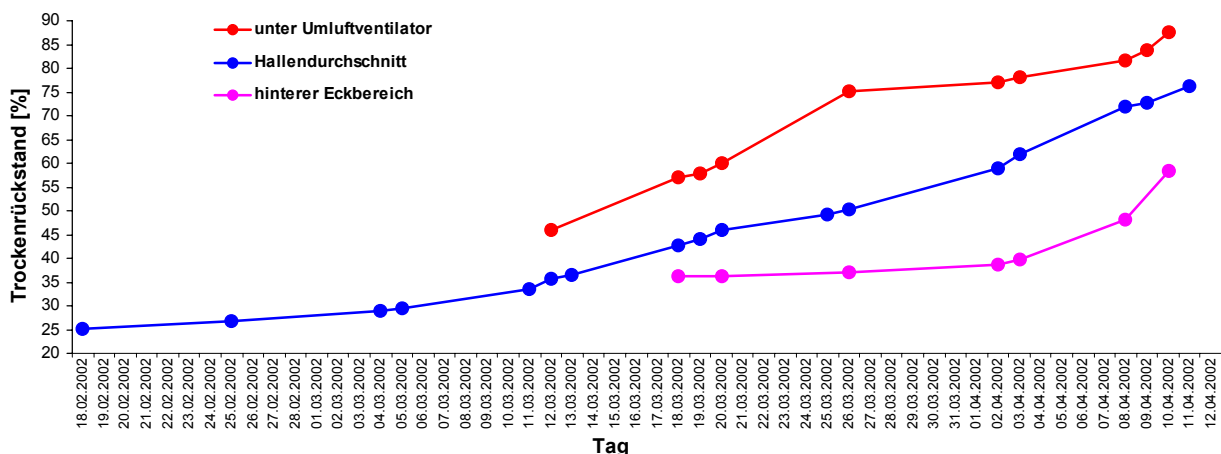


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des Trockenrückstands des zu trocknenden Klärschlammes während der U02

Tab. 5: Übersicht über physikalisch-chemische Parameter und Elementarzusammensetzung des zu trocknenden Klärschlammes (P0: Nassschlamm, P1: maschinell entwässerter Schlamm) während der U02; n.b.: nicht bestimmt

U02	Einheit	P0	P1									
		NS	18.02.	19.02.	25.02.	04.03.	05.03.	11.03.	12.03.	13.03.	18.03.	19.03.
Trockenrückstand	%	2,7	25,1	25,5	26,7	28,7	29,5	33,5	35,8	36,6	42,7	44,0
Glühverlust	% _{mT}	61,4	61,3	61,4	61,3	60,8	61,2	61,0	61,2	60,6	59,5	59,8
Kohlenstoff	% _{mT}	32,2	32,7	32,7	31,6	30,9	31,2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wasserstoff	% _{mT}	4,47	4,47	4,45	4,32	3,94	3,98	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Stickstoff	% _{mT}	4,28	4,09	4,10	4,21	4,20	4,25	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Heizwert	MJ/kg	- 2,05	1,33	1,40	1,45	1,69	1,84	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Heizwert	MJ/kg _{mT}	12,3	12,6	12,6	12,1	12,0	12,1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Brennwert	MJ/kg	0,36	3,40	3,47	3,49	3,68	3,82	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Brennwert	MJ/kg _{mT}	13,3	13,6	13,6	13,1	12,8	12,9	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Glühverlust

Im Verlauf der Klärschlamm-trocknung ist eine geringfügige Abnahme des Glühverlusts von 61,4 %_{mT} im frisch entwässerten Klärschlamm auf 58,6 %_{mT} für den getrockneten Klärschlamm zum Untersuchungsende festzustellen (vgl. Tab. 5). Die Abnahme des Glühverlusts um 2,8 %_{mT} entspricht einem Abbau der ursprünglich enthaltenen organischen Substanz um 4,6 %.

Auf die Trockenmasse bezogen ist diese Reduzierung als nur geringfügig zu bewerten. Trotzdem stellt sich die Frage, was prinzipiell für die Abnahme des Glühverlustes spricht, da Messungenauigkeiten und Störstoffe bei der Probenahme als alleinige Ursache aufgrund des eindeutigen Trends zur Abnahme ausgeschlossen werden können. Ein anaerober Abbau durch einen möglichen Nachfaulprozess erscheint aufgrund der intensiven Belüftung des Klärschlammes durch die automatische Wendeeinrichtung von untergeordneter Bedeutung. Somit müssen aerobe Abbauprozesse für die Abnahme der organischen Substanz im Klärschlamm verantwortlich gemacht werden.

Heizwert

Die Abb. 7 gibt einen Überblick über die zeitliche Entwicklung des Heizwerts des Klärschlammes über den Verlauf der U02. Da der Heizwert sehr stark vom Wassergehalt des Klärschlammes abhängt, sind zudem die zeitlich korrespondierenden Trockenrückstände dargestellt.

Aus dem Vergleich der Kurvenverläufe, die nahezu identisch sind, folgt, dass der Heizwert primär vom Wassergehalt des Klärschlammes abhängt und mit diesem eng korreliert. Im Verlauf der Trocknung des Klärschlammes erhöht sich der Heizwert von 1,33 MJ/kg im maschinell entwässerten Klärschlamm (vgl. Tab. 5) auf 8,62 MJ/kg im getrockneten Klärschlamm. Mit diesem Heizwert für den getrockneten Klärschlamm, der in der Größenordnung des Heizwerts von (Roh-)Braunkohle liegt [5], wird in der U02 der für die energetische Verwertung von Klärschlämmen nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz geforderte Mindestheizwert von 11.000 kJ/kg [6] jedoch nicht erreicht.

Tab. 5 (Forts.): Übersicht über physikalisch-chemische Parameter und Elementarzusammensetzung des zu trocknenden Klärschlamm (P0: Nassschlamm, P1: maschinell entwässerter Schlamm) während der U02; n.b.: nicht bestimmt

										U02
20.03.	25.03.	26.03.	02.04.	03.04.	08.04.	09.04.	10.04.	11.04.	Einheit	
46,1	49,3	50,3	58,8	62,0	71,8	72,7	n.b.	76,2	%	Trockenrückstand
59,7	60,0	59,4	59,6	58,5	58,9	58,6	58,4	58,6	% _{mT}	Glühverlust
n.b.	31,1	31,2	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	30,9	31,1	% _{mT}	Kohlenstoff
n.b.	4,08	4,24	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,05	3,95	% _{mT}	Wasserstoff
n.b.	4,03	4,18	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,12	4,13	% _{mT}	Stickstoff
n.b.	4,49	4,74	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	8,04	8,62	MJ/kg	Heizwert
n.b.	11,6	11,8	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	11,7	12,1	MJ/kg _{mT}	Heizwert
n.b.	6,17	6,42	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9,33	9,85	MJ/kg	Brennwert
n.b.	12,5	12,8	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	12,6	12,9	MJ/kg _{mT}	Brennwert

Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff

Die Ergebnisse der Elementaruntersuchungen der Klärschlämme auf Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff sind in Tab. 5 angegeben; zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nassschlammuntersuchung (18.02.2002) mit aufgeführt.

Für die Kohlenstoffgehalte liegt eine geringfügige, kontinuierliche Abnahme über den Trocknungsverlauf vor. Die Abnahme kann dabei, wie bereits bei der Interpretation der Glühverluste erläutert, auf aerobe Abbauprozesse im Klärschlamm zurückgeführt werden.

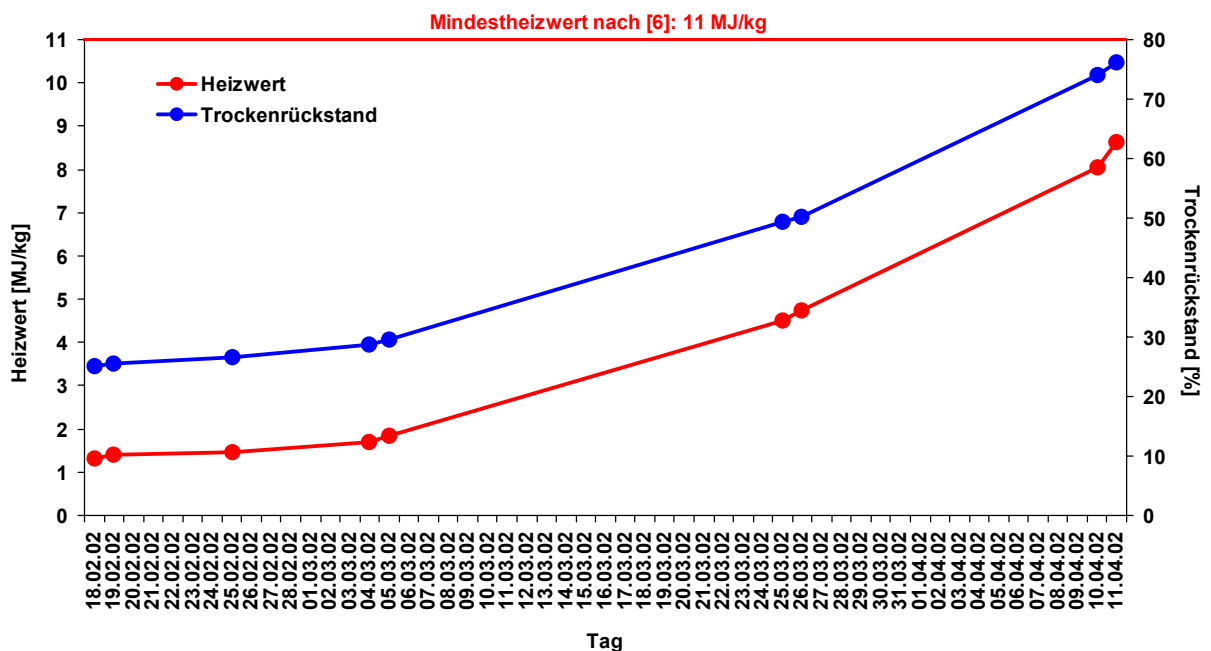


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf des Heizwerts des zu trocknenden Klärschlamm im Vergleich zum Trockenrückstand während der U02

Tab. 6: Übersicht über die Gehalte an anorganischen Stoffen im Klärschlamm der Kläranlage Füssen im Vergleich zu den Durchschnittswerten bayerischer Kläranlagen [7] und zu den Grenzwerten der AbfKlärV [8], Untersuchung U02

U02	Einheit							Durchschnittswert	
		P0 18.02.	P1 18.02.	19.02.	25.02.	04.03.	05.03.	bayer. Kläranlagen [7]	AbfKlärV [8]
Pb	mg/kg _{mT}	24,8	23,8	23,6	23,6	24,0	26,1	60	900
Cr	mg/kg _{mT}	24,8	24,8	24,3	26,4	26,8	26,1	44	900
Cu	mg/kg _{mT}	340	327	339	349	360	358	325	800
Zn	mg/kg _{mT}	1.101	1.090	1.107	1.132	1.201	1.160	1.056	2.500/2.000 ^{*)}
Cd	mg/kg _{mT}	1,10	1,09	1,11	1,13	1,11	1,16	1,3	10/5 ^{*)}
Ni	mg/kg _{mT}	21,1	20,8	21,4	22,6	23,1	23,2	30	200
Hg	mg/kg _{mT}	0,48	0,57	0,49	0,58	0,59	0,61	0,8	8
Fe	g/kg _{mT}	43,5	43,8	46,8	47,2	47,7	48,3	k.A.	k.A.
P _{ges}	g/kg _{mT}	37,8	36,7	37,5	38,1	39,4	40,0	24,5	k.A.

^{*)} verschärfte Grenzwerte für leichte Böden und Böden mit pH-Werten zwischen 5 und 6

Da der im Klärschlamm enthaltene Kohlenstoff mit dem Glühverlust und Heizwert des Schlammes korreliert, sind in Abb. 8 die Kohlenstoffgehalte des Klärschlammes den korrespondierenden Heizwerten sowie Glühverlusten der Klärschlamm-trockenmasse gegenübergestellt. Bei allen drei Kurven lässt sich eine leicht fallende Tendenz erkennen. Ein aerober Abbau der organischen Substanz durch Mikroorganismen führt im Klärschlamm zu einer Abnahme des Kohlenstoffgehalts.

Der geringere Kohlenstoffgehalt im Klärschlamm bedingt wiederum einen geringeren Glühverlust und einen geringeren Heizwert der Klärschlamm-trockenmasse. Der Wasserstoffgehalt verringerte sich während des Trocknungsverlaufs nur leicht. Der Stickstoffgehalt blieb im Verlauf der Trocknung weitestgehend konstant, was auch die geringen Ammoniakemissionen (vgl. Abschn. 5.2.2.1.8) und die geringe Geruchsbelastung (Abschn. 5.2.2.3.1) bestätigen. Die Schwankungen der Messwerte liegen innerhalb probenahmebedingter Messunsicherheiten.

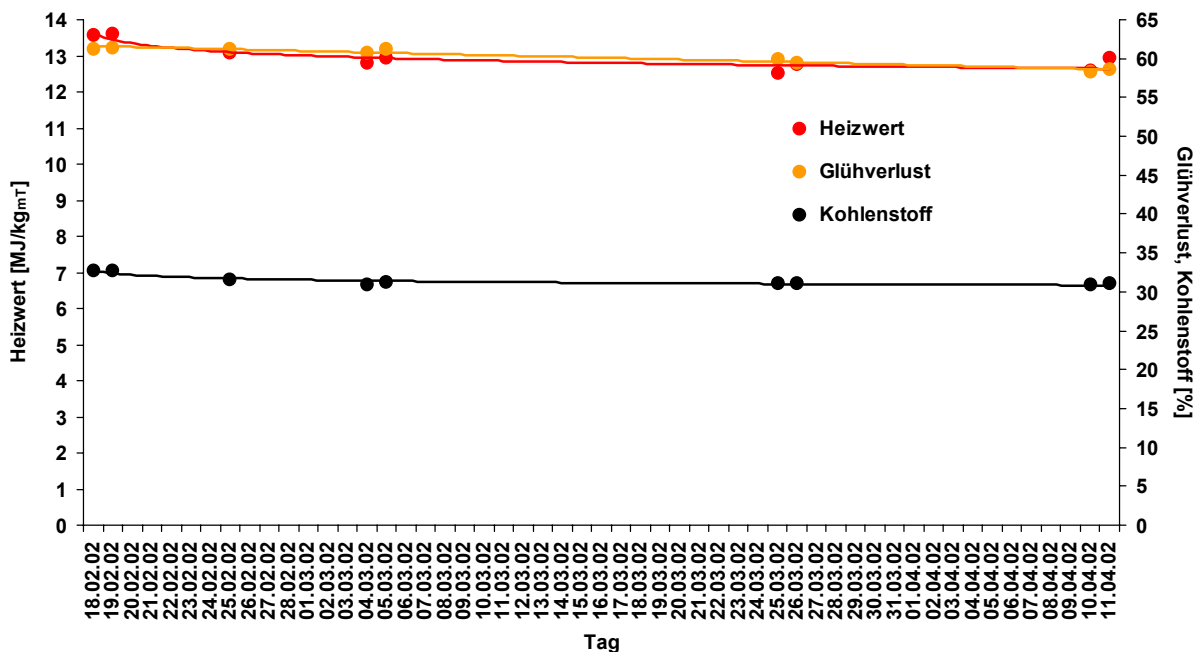


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Kohlenstoffgehalts des zu trocknenden Klärschlammes im Vergleich zum Heizwert und Glühverlust während der U02

Tab. 6 (Forts.): Übersicht über die Gehalte an anorganischen Stoffen im Klärschlamm der Kläranlage Füssen im Vergleich zu den Durchschnittswerten bayerischer Kläranlagen [7] und zu den Grenzwerten der AbfKlärV [8], Untersuchung U02

25.03.	26.03.	10.04.	11.04.	Durchschnittswert		Einheit	U02
				bayer. Kläranlagen [7]	AbfKlärV [8]		
26,3	24,5	26,0	26,8	60	900	mg/kg _{mT}	Pb
24,3	22,7	25,1	26,8	44	900	mg/kg _{mT}	Cr
364	336	358	351	325	800	mg/kg _{mT}	Cu
1.113	998	1.165	1.107	1.056	2.500/2.000 ^{*)}	mg/kg _{mT}	Zn
1,22	1,09	1,17	1,29	1,3	10/5 ^{*)}	mg/kg _{mT}	Cd
22,3	20,0	20,6	22,1	30	200	mg/kg _{mT}	Ni
0,63	0,52	0,52	0,55	0,8	8	mg/kg _{mT}	Hg
56,7	51,7	57,3	55,2	k.A.	k.A.	g/kg _{mT}	Fe
43,3	39,0	43,2	42,8	24,5	k.A.	g/kg _{mT}	P _{ges}

^{*)} verschärfte Grenzwerte für leichte Böden und Böden mit pH-Werten zwischen 5 und 6

5.2.1.2 Anorganische Komponenten

Die Metall- und Phosphor-Konzentrationen der Klärschlämme sind für die solare Trocknung in der Tab. 6 zusammengefasst und den Ausgangsgehalten im Nassschlamm, den durchschnittlichen Gehalten kommunaler Klärschlämme Bayerns [7] sowie den Grenzwerten der AbfKlärV [8] gegenübergestellt.

Die Metall-Gehalte im Klärschlamm bleiben über den Trocknungsverlauf weitestgehend konstant und unterscheiden sich kaum von den Metall-Gehalten im Nassschlamm. Die auftretenden Gehalts-Schwankungen liegen im Bereich der probenahmetechnischen und analytischen Unsicherheiten. Die Metalle verbleiben demzufolge bei der maschinellen Entwässerung und der solaren Trocknung im Klärschlamm.

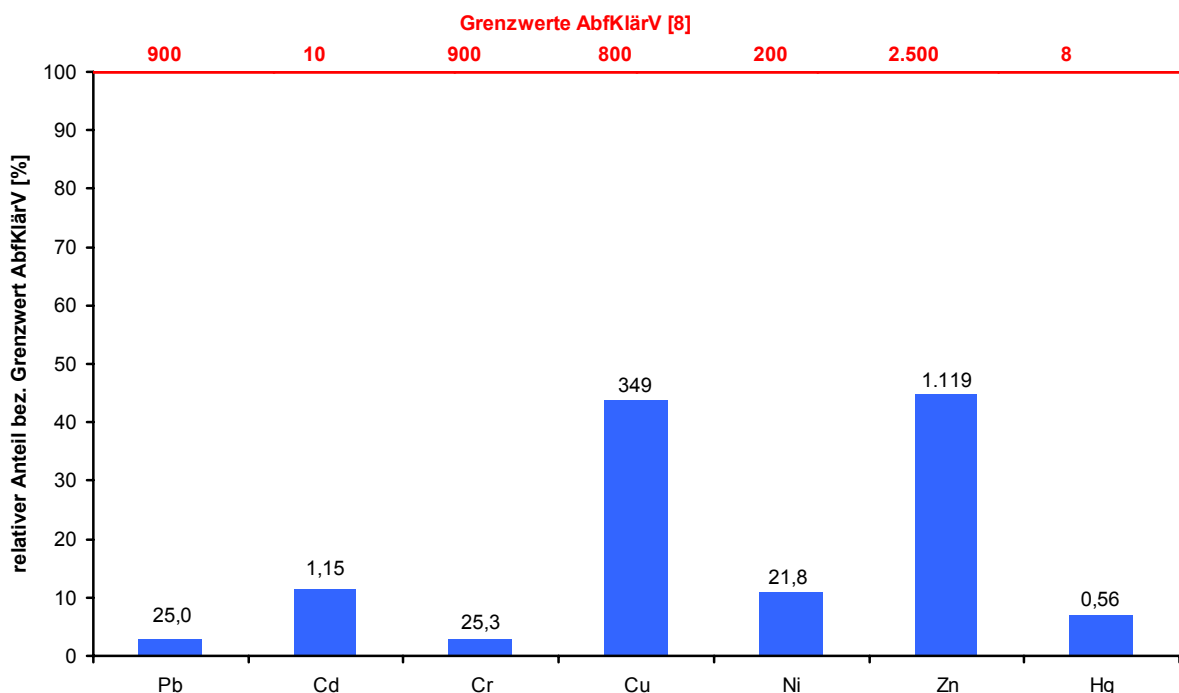


Abb. 9: Vergleich der über die U02 gemittelten Metall-Gehalte des Klärschlammes der Kläranlage mit den Grenzwerten der AbfKlärV [8]; alle Angaben in mg/kg_{mT}

Tab. 7: Übersicht über die Gehalte an organischen Stoffen (Summenparameter) des Klärschlammes (P0: Nassschlamm, P1: maschinell entwässerter Schlamm) im Vergleich zu den Durchschnittswerten bayerischer Kläranlagen [7] und zu den Grenzwerten der AbfKlärV [8] während der U01; n.b.: nicht bestimmt, k.A.: keine Angabe

U01	Einheit	P0	P1		Durchschnittswert		AbfKlärV [8]
		10.09.	10.09.	08.10.	06.11.	bayer. Kläranlagen [7]	
AOX	mg/kg _{mT}	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	194	500
PCDD/F	ng I-TE/kg _{mT}	10,6	11,2	11,7	11,7	11,8	100
PCB	mg/kg _{mT}	0,065	0,068	0,066	0,072	0,102	(1,2) ^{*)}
PCPh	µg/kg _{mT}	154	176	131	138	k.A.	k.A.
PAK	mg/kg _{mT}	9,32	7,67	6,05	6,37	k.A.	k.A.

^{*)} je Komponente (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) 0,2 mg/kg_{mT}

Die durchschnittlichen Metall-Gehalte des Klärschlammes sind für Blei um 58 %, Chrom um 43 %, Quecksilber um 30 %, Nickel um 27 % und Cadmium um 12 % geringer als die durchschnittlich in bayerischen Klärschlämmen vorliegenden Gehalte [7]. Für Zink und Kupfer ergeben sich geringfügig höhere Gehalte (ca. 7 %).

Der Schlamm weist einen durchschnittlichen Eisen-Gehalt von 5,0 %_{mT} auf. Dieser ist an der Kläranlage Füssen-Ehrwang infolge der im Abwasserreinigungsprozess durchgeführten Phosphat-Fällung mit FeClSO₄ als Fällungsmittel höher als in Klärschlämmen vergleichbarer Anlagen ohne Phosphat-Fällung. Erwartungsgemäß liegt auch der Phosphor-Gehalt mit fast 40 g/kg_{mT} (= 4,0 %_{mT}) höher als der durchschnittliche, mit 2,5 %_{mT} für bayerische Klärschlämme angegebene Gehalt [7]. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass das bei der Phosphatelimination mit FeClSO₄ gebildete Fällprodukt (FePO₄) im Klärschlamm verbleibt.

In Abb. 9 sind zur Veranschaulichung der Klärschlammbelastung mit Metallen die über die U02 gemittelten Gehalte bezogen auf die Grenzwerte der AbfKlärV [8] dargestellt; sämtliche Metall-Gehalte unterschreiten die Grenzwerte deutlich. Der Schlamm ist damit hinsichtlich seiner Metall-Belastung prinzipiell für eine Verwertung in der Landwirtschaft geeignet.

5.2.1.3 Organische Komponenten

Die Gehalte an adsorbierbaren organischen Halogenverbindungen (AOX), polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen (PCDD/F), polychlorierten Biphenylen (PCB), polychlorierten Benzolen (PCBz), polychlorierten Phenolen (PCPh) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in

Tab. 8: Übersicht über die Gehalte an organischen Stoffen (Summenparameter) des zu trocknenden Klärschlammes (P0: Nassschlamm, P1: maschinell entwässerter Schlamm) im Vergleich zu den Durchschnittswerten bayerischer Kläranlagen [7] und zu den Grenzwerten der AbfKlärV [8] während der U02; n.b.: nicht bestimmt, k.A.: keine Angabe

U02	Einheit	P0	P1				Durchschnittswert		AbfKlärV [8]
		18.02.	18.02.	19.02.	25.02.	04.03.	05.03.	bayer. Kläranlagen [7]	
AOX	mg/kg _{mT}	300	240	210	260	300	280	194	500
PCDD/F	ng I-TE/kg _{mT}	n.b.	10,4	n.b.	9,54	n.b.	n.b.	11,8	100
PCB	mg/kg _{mT}	n.b.	0,069	n.b.	0,068	n.b.	n.b.	0,102	(1,2) ^{*)}
PCBz ^{**)}	µg/kg _{mT}	n.b.	33,0	n.b.	30,1	n.b.	n.b.	k.A.	k.A.
PCPh	µg/kg _{mT}	n.b.	32	n.b.	218	n.b.	n.b.	k.A.	k.A.
PAK	mg/kg _{mT}	n.b.	4,14	n.b.	3,50	n.b.	n.b.	k.A.	k.A.

^{*)} je Komponente (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) 0,2 mg/kg_{mT}

^{**)} ohne Mono-, Dichlorbenzole

den Klärschlämmen sind für den solaren Trocknungsprozess in den Tab. 7 und 8 zusammengefasst.

Die AOX-, PCDD/F- und PCB-Gehalte sind den Nassschlammgehalten vor der maschinellen Entwässerung, den durchschnittlichen Gehalten kommunaler Klärschlämme Bayerns [7] und den Grenzwerten der AbfKlärV [8] gegenübergestellt.

Adsorbierbare organische Halogenverbindungen

Mit AOX-Gehalten bei Einzelwerten zwischen 210 bis 300 mg/kg_{mT} (Mittelwert: 270 mg/kg_{mT}) wird der Grenzwert der AbfKlärV von 500 mg/kg_{mT} [8] bezüglich AOX deutlich unterschritten. Die AOX-Gehalte in den Klärschlämmen sind im Vergleich zum durchschnittlichen für Klärschlämme aus bayerischen Kläranlagen angegebenen AOX-Gehalt von 194 mg/kg_{mT} [7] etwas höher.

Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane

Zur Veranschaulichung der PCDD/F-Konzentrationsverhältnisse den Klärschlämmen sind in Abb. 10 die Konzentrationen der PCDD/F-Einzelkongenere in den Klärschlämmen, die aus den Einzelkongenergehalten gebildeten Summen sowie die relativen Anteile der Einzelkongenere an den PCDD/F-Summengehalten (PCDD/F-Kongenerenverteilungsmuster) für die U01 und die U02 dargestellt.

Die PCDD/F-Gehalte verändern sich durch die maschinelle Entwässerung und im weiteren Verlauf der solaren Trocknung in der U01 im Klärschlamm nahezu nicht. Dagegen ist in der U02 eine kontinuierliche Abnahme der PCDD/F-Gehalte um etwa 15 % von anfänglich 10,4 ng I-TE/kg_{mT} auf 8,9 ng I-TE/kg_{mT} zum Ende der Untersuchung hin festzustellen. Die Kongenerenverteilungsmuster verändern sich sowohl in der U01 als auch U02 über den Verlauf des solaren Trocknungsprozesses nur unwesentlich. Die in Abb. 10 in der U01 für den Nassschlamm und in der U02 im teilgetrockneten Klärschlamm (02.04.2002) im Vergleich zu den restlichen Proben unterschiedlichen Verteilungsmuster beruhen darauf, dass Einzelkongenere mit Gehalten unter der analytischen Bestimmungsgrenze bei der Summenbildung und im Verteilungsmuster unberücksichtigt bleiben: so waren das 2,3,7,8-tetrachlorierte Dibenzodioxin im Nassschlamm in der U01 und das 1,2,3,7,8-pentachlorierte Dibenzodioxin im teilgetrockneten Klärschlamm am 02.04.2002 nicht nachweisbar.

Mit Summenwerten von 10,6 ng I-TE/kg_{mT} für den Nassschlamm, 11,2 ng I-TE/kg_{mT} bzw. 10,4 ng I-TE/kg_{mT} für den maschinell entwässerten Klärschlamm und 11,7 ng I-TE/kg_{mT} bzw. 8,90 ng I-TE/kg_{mT} für den solar getrockneten Klärschlamm ist der Klärschlamm als generell gering mit PCDD/F belastet einzustufen. Dies zeigt auch der direkte Vergleich mit dem Grenzwert der AbfKlärV von 100 ng I-TE/kg_{mT} [8], der um das 10-fache höher liegt – vgl. Tab. 7, 8.

Tab. 8 (Forts.): Übersicht über die Gehalte an organischen Stoffen (Summenparameter) des zu trocknenden Klärschlammes (P0: Nassschlamm, P1: maschinell entwässertes Schlamm) im Vergleich zu den Durchschnittswerten bayerischer Kläranlagen [7] und zu den Grenzwerten der AbfKlärV [8] während der U02; n.b.: nicht bestimmt, k.A.: keine Angabe

					Durchschnittswert bayer. Kläranlagen [7]	AbfKlärV [8]	Einheit	U02
25.03.	26.03.	02.04.	10.04.	11.04.				
290	280	n.b.	290	280	194	500	mg/kg _{mT}	AOX
n.b.	n.b.	8,92	n.b.	8,90	11,8	100	ng I-TE/kg _{mT}	PCDD/F
n.b.	n.b.	0,074	n.b.	0,070	0,102	(1,2) ^{*)}	mg/kg _{mT}	PCB
n.b.	n.b.	33,2	n.b.	30,1	k.A.	k.A.	µg/kg _{mT}	PCBz ^{**)}
n.b.	n.b.	191	n.b.	175	k.A.	k.A.	µg/kg _{mT}	PCPh
n.b.	n.b.	2,68	n.b.	2,20	k.A.	k.A.	mg/kg _{mT}	PAK

^{*)} je Komponente (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180) 0,2 mg/kg_{mT}

^{**)} ohne Mono-, Dichlorbenzole

Gegenüber Schlämmen aus anderen bayerischen Kläranlagen, bei denen im Jahr 2001 ein durchschnittlicher PCDD/F-Gehalt von 11,8 ng I-TE/kg_{mT} [7] ermittelt wurde, befindet sich der Klärschlamm der Kläranlage des AZV Füssen sowohl in der U01 als auch in der U02 in einem für bayerische Klärschlämme aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen typischen Konzentrationsbereich.

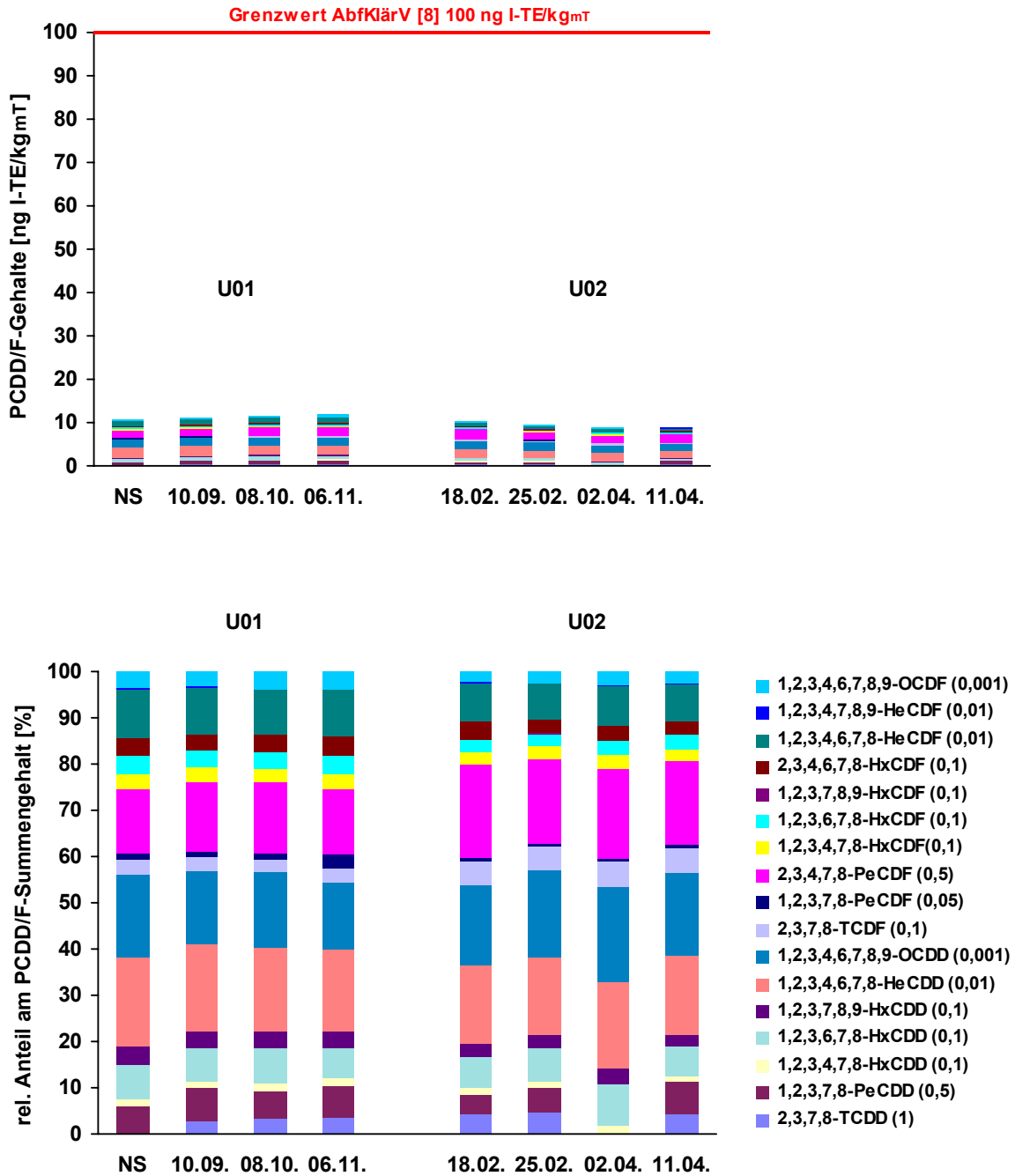


Abb. 10: Darstellung der PCDD/F-Gehalte (Summe und Einzelkongenere ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) des zu trocknenden Klärschlammes {alle Angaben als internationale Toxizitätsäquivalente (I-TE) nach Anhang 1 der AbfklärV [8]} sowie der relativen Anteile der Einzelkongenergehalte an den PCDD/F-Summengehalten während der U01 und der U02

Polychlorierte Biphenyle

Der PCB-Gehalte bleiben im Klärschlamm über den Verlauf der Trocknung in der U01 und der U02 nahezu konstant; die Summe der sechs PCB-Kongeneren Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 der AbfKlärV [8] beträgt im Nassschlamm 0,065 mg/kg_{mT}, im maschinell entwässerten Klärschlamm 0,068 mg/kg_{mT} (U01) bzw. 0,069 mg/kg_{mT} (U02) und im solar abgetrockneten Klärschlamm 0,072 mg/kg_{mT} (U01) bzw. 0,070 mg/kg_{mT} (U02) – vgl. Tab. 7, 8. Die Abb. 11 zeigt die Konzentrationen der PCB-Einzelkongeneren, die aus den PCB-Einzelkongenergehaltem gebildeten Summengehalte sowie die relativen Anteile der PCB-Einzelkongeneren an den Summengehalten (Kongenerenverteilungsmuster) für die U01 und U02 in grafischer Form.

Das PCB-Kongenerenverteilungsmuster für den Klärschlamm ändert sich bei der maschinellen Entwässerung und im Verlauf der solaren Trocknung kaum. Die niedrig chlorierten PCB Nr. 28 und 52 sind im Nassschlamm, maschinell entwässerten und solar getrockneten Schlamm in geringerer Konzentration als die höher chlorierten PCB enthalten. Während die tri- und tetrachlorierten Biphenyle (Nr. 28 und 52) in der U01 jeweils nur zu knapp 5 % bis 7 % zur PCB-Gesamtbelastung beitragen, liegen die penta- (Nr. 101), hexa- (Nr. 138 und Nr. 153) und heptachlorierten Biphenyle (Nr. 180) mit Anteilen zwischen 15 % und 36 % am Gesamtgehalt in deutlich höherer Konzentration vor. Die Hauptkomponente der PCB-Belastung stellt in der U01 mit durchschnittlich 35 % bis 36 % des PCB-Summengehalts (durchschnittlich 0,024 mg/kg_{mT}) das hexachlorierte Biphenyl Nr. 138.

In der U02 tragen die tri- und tetrachlorierten Biphenyle (Nr. 28 und 52) zu 5 % bis 9 % zur PCB-Gesamtbelastung bei. Die penta- (Nr. 101), hexa- (Nr. 138 und Nr. 153) und heptachlorierten Biphenyle (Nr. 180) liegen erneut mit Anteilen zwischen 13 % und 31 % am Gesamtgehalt in deutlich höherer Konzentration vor. Im Gegensatz zur U01 stellt das heptachlorierte Biphenyl Nr. 180 in der U02 mit durchschnittlich 26 % bis 31 % des PCB-Summengehalts (durchschnittlich 0,020 mg/kg_{mT}) die Hauptkomponente der PCB-Belastung.

Insgesamt liegen die polychlorierten Biphenyle mit Einzelkongenergehaltem in der U01 und U02 im Bereich zwischen 0,003 mg/kg_{mT} und 0,025 mg/kg_{mT} allesamt unter dem Grenzwert der AbfKlärV von 0,2 mg/kg_{mT} [8] pro Einzelkongener.

Im Vergleich zu Klärschlämmen aus anderen bayerischen Kläranlagen, bei denen PCB-Einzelkongenergehalte im Bereich zwischen 0,009 mg/kg_{mT} und 0,025 mg/kg_{mT} und Summengehalte von 0,102 mg/kg_{mT} [7] festgestellt wurden, weisen die Klärschlämme des AZV Füssen sowohl in der U01 als auch in der U02 eine typische Konzentrationshöhe auf.

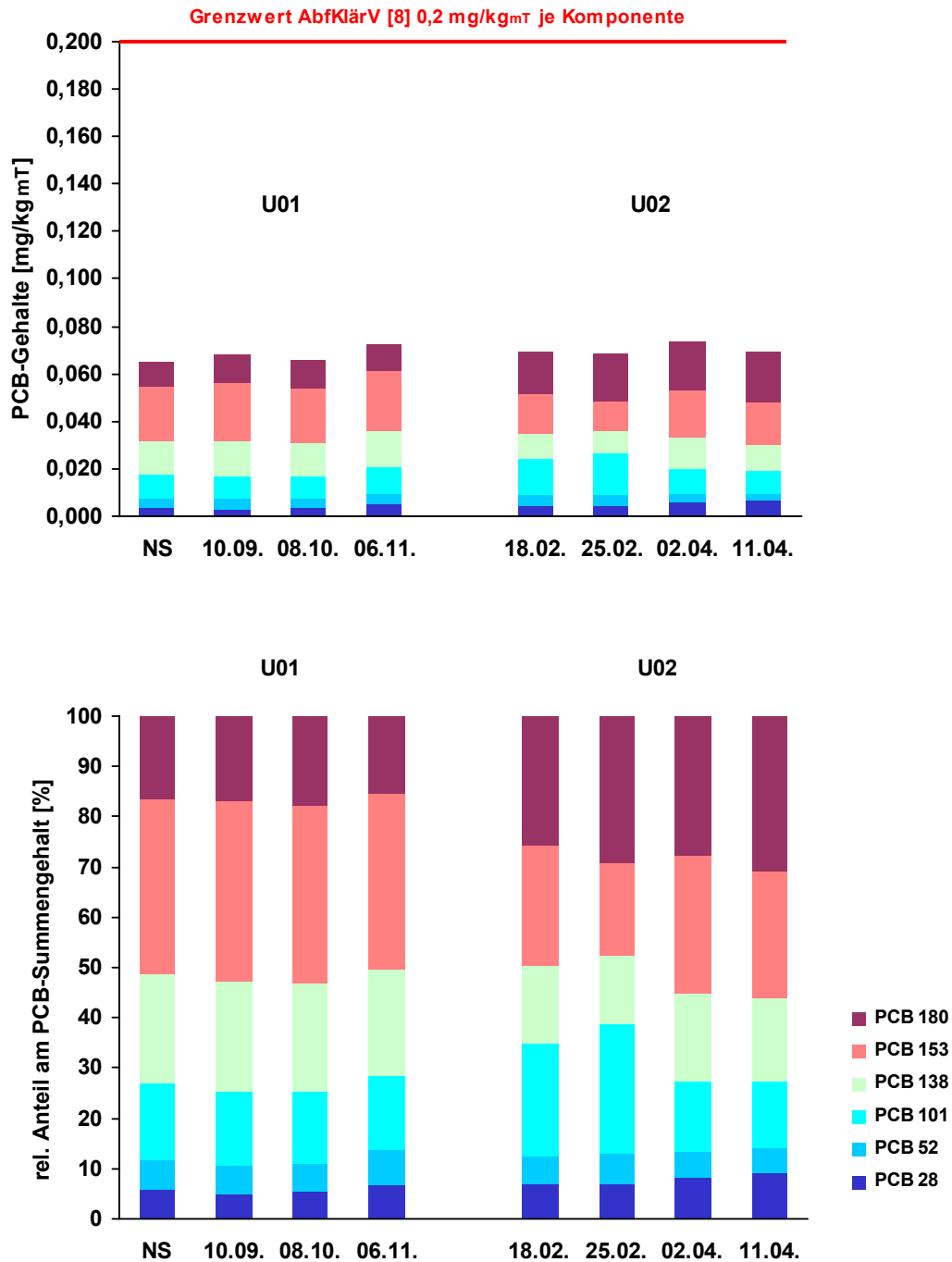


Abb. 11: Darstellung der Einzelgehälter der PCB Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 (nach AbfKlärV [8]) und deren Summen sowie deren relative Anteile an den PCB-Summengehalten des zu trocknenden Klärschlammes während der U01 und der U02

Polychlorierte Benzole

Die PCBz wurden in den Klärschlämmen nur während der U02 bestimmt. Die PCBz-Gehalte im Klärschlamm bleiben über den Verlauf der Trocknung in der U02 nahezu konstant – vgl. Tab. 8 und Abb. 12. Die Gehaltsschwankungen bewegen sich im Bereich probenahme- und analysentechnischer Unsicherheiten. Bei dem gewählten Aufbereitungsverfahren waren Mono- und Dichlorbenzole aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit in keiner der Proben bestimmbar.

Die Abb. 12 zeigt für die U02 die Konzentrationen der PCBz unterschiedlichen Chlorierungsgrads, die sich hieraus ergebenden PCBz-Summengehalte sowie die relativen Anteile der PCBz unterschiedlichen Chlorierungsgrads an den Summengehalten (Verteilungsmuster). An polychlorierten Benzolen (PCBz) wurden in den Klärschlämmen in der U02 Gehalte von 30,1 $\mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ bis 33,2 $\mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ ermittelt. Wie die Abb. 12 veranschaulicht, liegt im Klärschlamm über den Verlauf der U02 ein charakteristisches Verteilungsmuster für die PCBz unterschiedlichen Chlorierungsgrads vor.

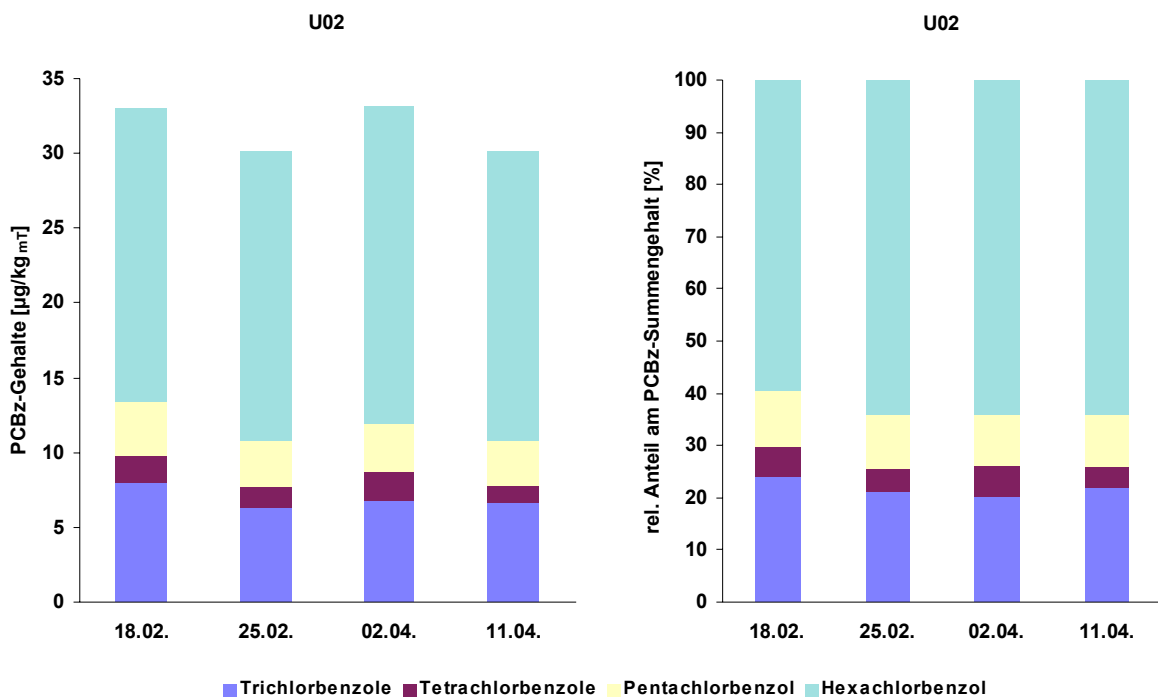


Abb. 12: Darstellung der Einzelgehälter der Tri- und Tetrachlorbenzole sowie des Penta- und Hexachlorbenzols und deren Summen sowie deren relative Anteile an den PCBz-Summengehalten des zu trocknenden Klärschlammes während der U02

Polychlorierte Phenole

Für die polychlorierten Phenole (PCPh) wurden in den Klärschlämmen in der U01 Gehalte zwischen $131 \mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ und $176 \mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ und in der U02 zwischen $32 \mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ und $218 \mu\text{g}/\text{kg}_{\text{mT}}$ ermittelt (vgl. Abb. 13). Sowohl während der U01 als auch U02 zeigt sich damit eine hohe Schwankungsbreite in den PCPh-Konzentrationen.

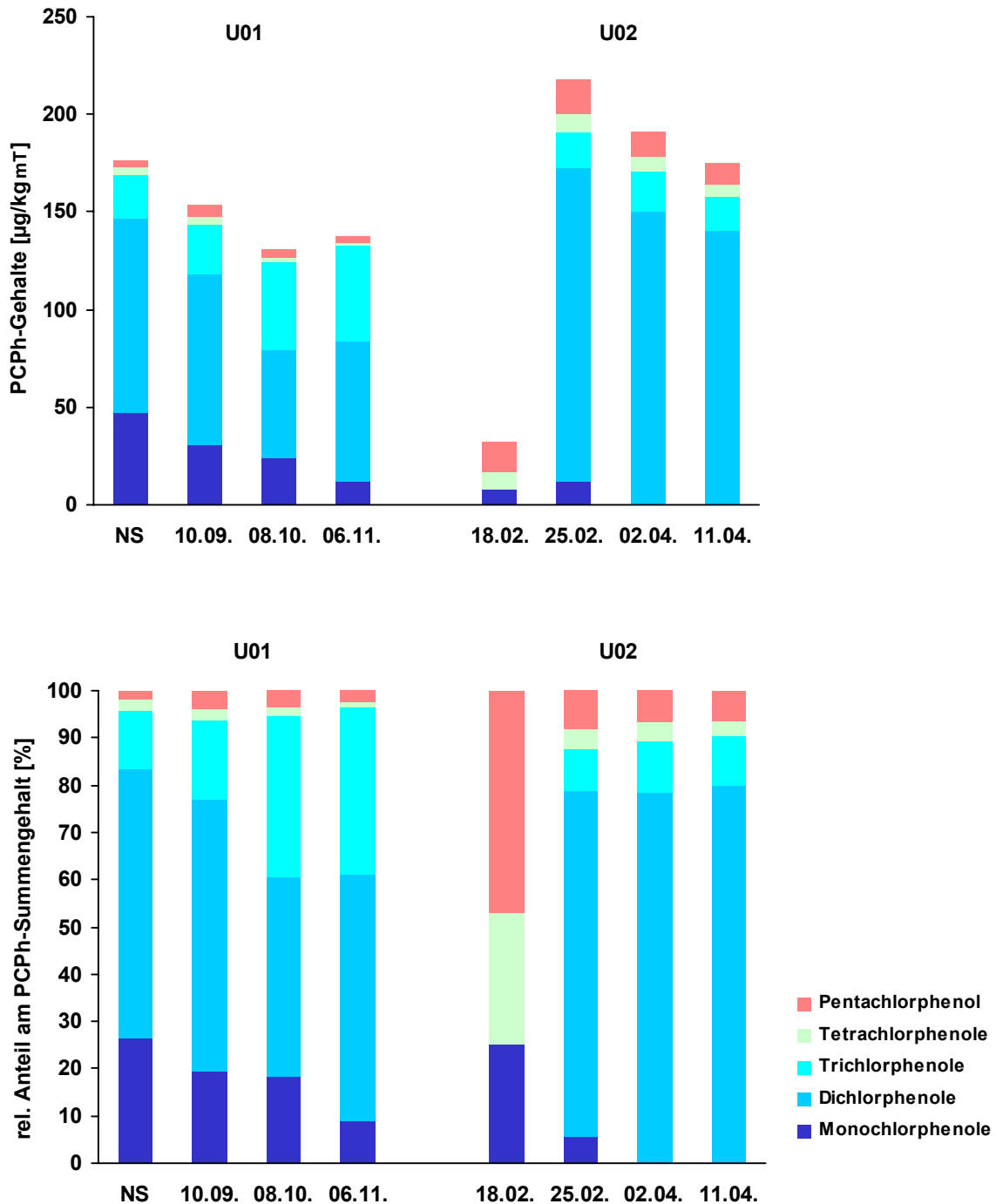


Abb. 13: Darstellung der Einzelgehälter der Mono-, Di-, Tri- und Tetrachlorphenole sowie des Pentachlorphenols und deren Summen (ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) sowie deren relative Anteile an den PCPh-Summengehalten im zu trocknenden Klärschlamm während der U01 und der U02

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Die Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) als Summenwert von 16 Einzelverbindungen (entsprechend EPA [9] - siehe Abschn. 4.1.1) nehmen bei der Trocknung in der U01 vom maschinell entwässerten Klärschlamm mit 9,32 mg/kg_{mT} um durchschnittlich ca. 32 % auf 6,37 mg/kg_{mT} und in der U02 von 4,14 mg/kg_{mT} um durchschnittlich ca. 47 % auf 2,20 mg/kg_{mT} zum getrockneten Klärschlamm ab – vgl. Tab. 7, 8 und Abb. 14.

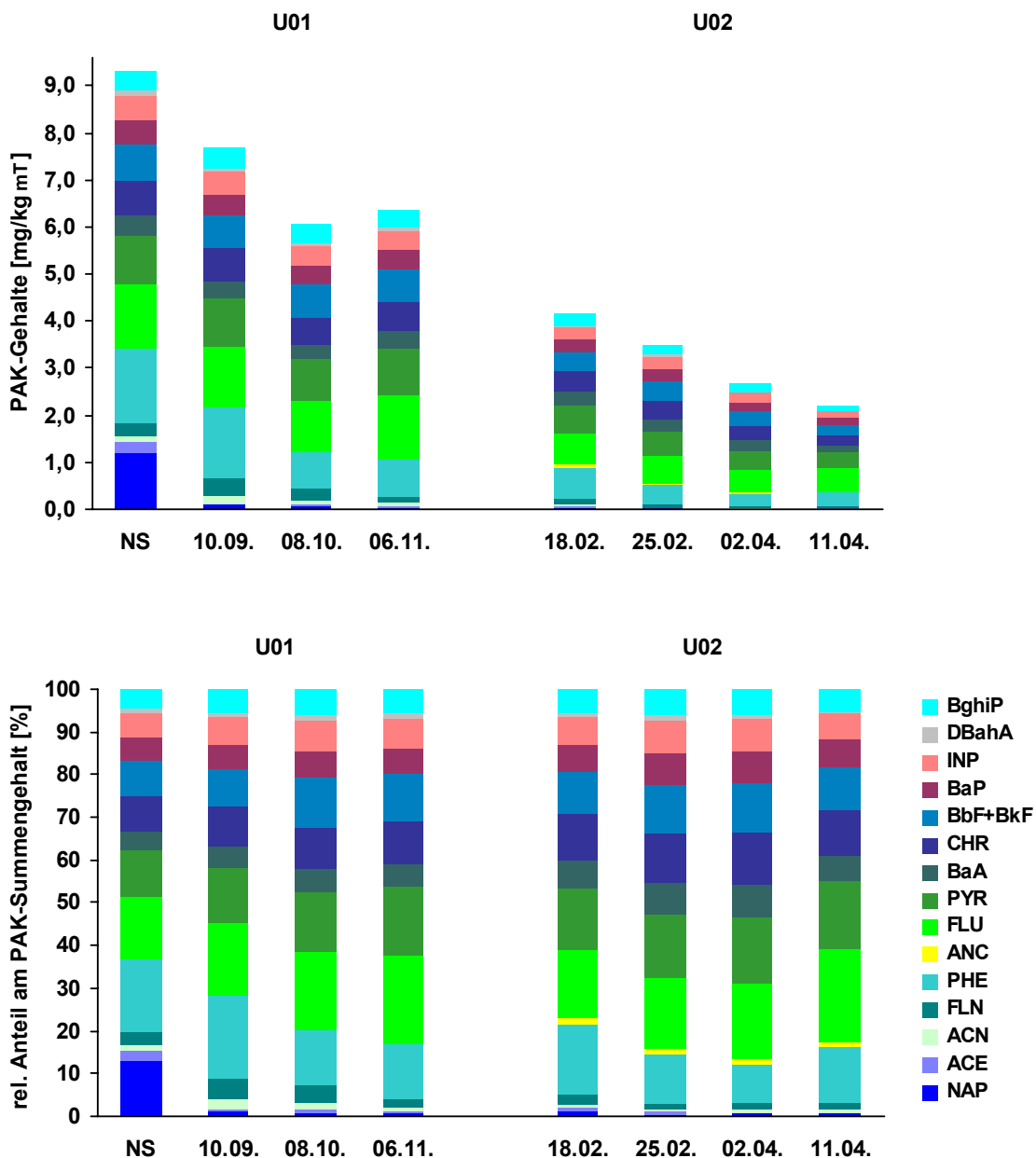


Abb. 14: Darstellung der PAK-Gehalte und deren Summen (16 Einzelkomponenten nach [9] ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) des zu trocknenden Klärschlammes sowie der relativen Anteile an den PAK-Summengehalten während der U01 und der U02

Die Klärschlamm-trocknung führt damit zu einer merklichen Reduzierung der PAK-Gehalte im Verlauf des Trocknungsprozesses. Die PAK-Abnahme wird zu Beginn des Trocknungsprozesses maßgeblich durch die Abnahme der leichterflüchtigen PAK-Verbindungen Naphthalin (NAP: U01: – 96 %, U02: – 72 %), Acenaphthylen (ACE: U01: – 84 %, U02: – 81 %), Acenaphthen (ACN: U01: – 55 %, U02: – 63 %) und Fluoren (FLN: U01: – 57 %, U02: – 65 %) bestimmt. Diese Komponenten gehen entweder bei den im Trockner vorherrschenden Prozessbedingungen rasch in die Gasphase über oder werden biologisch abgebaut und sind dann im trockenen Klärschlamm nur noch in geringer Konzentration (unter 0,13 mg/kg_{mT}) vorhanden.

Entsprechend spiegelt sich die Abnahme einzelner PAK-Verbindungen in der Veränderung der Verteilungsmuster für die PAK-Einzelkomponenten vom maschinell entwässerten zum getrockneten Klärschlamm wieder.

Neben den o.g. Komponenten (entsprechend EPA [9]) wurden acht weitere PAK-Verbindungen (Benzo[b]fluoren, Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen, Benzo[ghi]fluoranthren, Benzo[e]pyren, Perylen, Dibenz[a,j]anthracen, Anthanthren und Coronen) bestimmt, die jedoch, wie die geringen Summengehalte von 0,88 mg/kg_{mT} für den entwässerten Klärschlamm und von 0,44 mg/kg_{mT} für den getrockneten Klärschlamm ergeben haben, nur eine untergeordnete Rolle bei der Beurteilung der PAK-Gesamtbelastung im Klärschlamm spielen.

5.2.2 Abluftemissionen

Von den in der Abluft der Trocknungsanlage erfassten Komponenten (vgl. Tab. 3 in Abschn. 4.1) wurden die Konzentrationen von Kohlenstoffmon-, -dioxid, Sauerstoff, Schwefeldioxid, Stickstoffmon-, -dioxid sowie organischen Stoffen (organischem Gesamtkohlenstoff) in mehreren Perioden, verteilt über den mehrwöchigen Trocknungsprozess, kontinuierlich gemessen. Bezogen auf die Gesamtdauer des Trocknungsprozesses, die bei der U01 etwa 1.370 h und bei der U02 etwa 1.270 h betrug, wurden die jeweiligen Konzentrationen in der U01 für 290 h (21,2 % der Gesamtdauer der U01) und in der U02 für 186 h (14,6 % der Gesamtdauer der U02) kontinuierlich erfasst.

5.2.2.1 Anorganische Komponenten

5.2.2.1.1 Kohlenstoffmonoxid

Die Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen in der Abluft wurden, verteilt über den mehrwöchigen Trocknungsprozess, in der U01 und der U02 in mehreren Perioden kontinuierlich gemessen. Sie befinden sich sowohl in der U01 als auch in der U02 permanent unterhalb der Nachweisgrenze des eingesetzten Messverfahrens von 5 mg/m³. Im Vergleich zu konventionellen direkten Trocknungsanlagen, die die Energie zur Trocknung des Klärschlammes aus der Verbrennung von fossilen oder biogenen Brennstoffen beziehen, spielen verfahrensbedingte Kohlenstoffmonoxid-Emissionen aus Brennerabgasen bei der solaren Klärschlamm-trocknung keine Rolle. Daneben scheidet die Freisetzung von Kohlenstoffmonoxid infolge thermischer Zersetzungs- oder Oxidationsprozesse im Klärschlamm aufgrund der niedrigen Trocknungstemperatur unter 50 °C [2] aus.

Im Vergleich zu konventionellen Trocknungsanlagen, die bei vergleichbaren Untersuchungen Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen in der Abluft im Bereich von 22 mg/m³ [10] oder 38 mg/m³ [11] aufwiesen, sind die Kohlenstoffmonoxid-Emissionen an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang irrelevant.

Etwaige, für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Kohlenstoffmonoxid-Beschränkungen, wie 50 mg/m³ als Tagesmittelwert gemäß der für Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen verbindlichen 17. BImSchV [13], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang bei weitem unterschritten.

5.2.2.1.2 Kohlenstoffdioxid

Der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Abluft wurde, verteilt über den mehrwöchigen Trocknungsprozess, in der U01 und U02 in mehreren Perioden kontinuierlich gemessen. Dabei wurden als Wochendurchschnittswerte Kohlenstoffdioxid-Gehalte zwischen 0,01 Vol.-% und 0,16 Vol.-% messtechnisch erfasst. Da die Genauigkeit des Messverfahrens jedoch nur 1,2 % des Messbereichsendwerts von 21 Vol.-% (entsprechend 0,25 Vol.-%) beträgt, ist in der Abluft von einem Kohlenstoffdioxid-Gehalt in der Höhe des Kohlenstoffdioxid-Gehalts der natürlichen Umgebungsluft (0,03 Vol.-% [14]) auszugehen.

Im Unterschied zu konventionellen Klärschlamm-trocknungsanlagen, die die thermische Energie für den Trocknungsprozess aus der Verbrennung biogener oder fossiler Brennstoffe gewinnen, kommen verfahrensbedingte Kohlenstoffdioxidemissionen mit einem Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt bei der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage nicht zum Tragen.

5.2.2.1.3 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen

Die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen in der Abluft, angegeben als Chlorwasserstoff, wurden diskontinuierlich, verteilt über den mehrwöchigen Untersuchungszeitraum, in der U01 an 13 Tagen und in der U02 an 6 Tagen durch separate Probenahmen bestimmt.

Sowohl in der U01 als auch in der U02 befinden sich die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen ständig unter der Nachweisgrenze des analytischen Bestimmungsverfahrens. Bedingt durch die unterschiedlichen Probenahmevolumina der Abluft, die in Abhängigkeit von den Probenahmedauern und den Laufzeiten der Abluftventilatoren (abhängig von den Witterungsverhältnissen) variieren, ergeben sich unterschiedlich hohe Nachweisgrenzen.

So befinden sich die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen in der U01 unter den Nachweisgrenzen im Bereich von 0,026 mg/m³ bis 0,202 mg/m³ und in der U02 von 0,033 mg/m³ und 1,046 mg/m³.

Im Vergleich zu konventionellen Trocknungsanlagen, die bei vergleichbaren Untersuchungen Konzentrationen in der Abluft im Bereich von 4,4 mg/m³ und < 0,2 mg/m³ [10] bzw. im Abgas nach thermischer Abluftbehandlung von 0,23 mg/m³ [11]) aufwiesen, sind die Emissionen gasförmiger anorganischer Chlorverbindungen an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang als sehr gering einzustufen.

Etwaige, für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Beschränkungen für gasförmige anorganische Chlorverbindungen, wie 20 mg/m³ gemäß der TA Luft [12] oder 10 mg/m³ als Tagesmittelwert gemäß der für Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen geltenden 17. BImSchV [13], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang deutlich unterschritten.

5.2.2.1.4 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen

Die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen in der Abluft, angegeben als Fluorwasserstoff, wurden diskontinuierlich, verteilt über den mehrwöchigen Untersuchungszeitraum, in der U01 an 13 Tagen und in der U02 an 6 Tagen durch einzelne Probenahmen bestimmt.

Sowohl in der U01 als auch in der U02 befinden sich die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen ständig unter der Nachweisgrenze des analytischen Bestimmungsverfahrens. Bedingt durch die unterschiedlichen Probenahmevolumina der Abluft, die in Abhängigkeit von den Probenahmedauern und den Laufzeiten der Abluftventilatoren (abhängig von den Witterungsverhältnissen) variieren, ergeben sich unterschiedlich hohe Nachweisgrenzen.

So befinden sich die Konzentrationen an gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen in der U01 unter den Nachweisgrenzen im Bereich von 0,019 mg/m³ bis 0,149 mg/m³ und in der U02 von 0,011 mg/m³ und 0,771 mg/m³.

Im Vergleich zu konventionellen Trocknungsanlagen, die bei vergleichbaren Untersuchungen Konzentrationen in der Abluft im Bereich von 0,009 mg/m³ und < 0,02 mg/m³ [10] bzw. im Abgas nach thermischer Abluftbehandlung von < 0,05 mg/m³ [11]) aufwiesen, sind die Emissionen gasförmiger anorganischer Fluorverbindungen an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang als gering einzustufen.

Etwaige, für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Beschränkungen für gasförmige anorganische Fluorverbindungen, wie 3 mg/m³ gemäß der TA Luft [12] oder 1 mg/m³ als Tagesmittelwert gemäß der für Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen geltenden 17. BImSchV [13], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang deutlich unterschritten.

5.2.2.1.5 Sauerstoff

Der Sauerstoffgehalt der Abluft lag in der U01 und U02 über den gesamten Untersuchungszeitraum bei annähernd konstant 21,0 Vol.-% und entsprach damit dem Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft [14].

5.2.2.1.6 Schwefeloxide

Die Konzentrationen an Schwefeloxiden in der Abluft, angegeben als Schwefeldioxid, wurden diskontinuierlich, verteilt über den mehrwöchigen Untersuchungszeitraum, in der U01 an 13 Tagen und in der U02 an 6 Tagen durch einzelne Probenahmen bestimmt.

Sowohl in der U01 als auch in der U02 befinden sich die Konzentrationen an Schwefeloxiden permanent unter der Nachweisgrenze des analytischen Bestimmungsverfahrens. Bedingt durch die unterschiedlichen Probenahmeholumina der Abluft, die in Abhängigkeit von den Probenahmedauern und den Laufzeiten der Abluftventilatoren (abhängig von den Witterungsverhältnissen) variieren, ergeben sich unterschiedliche Nachweisgrenzen.

So befinden sich die Konzentrationen an Schwefeloxiden in der U01 unter einer Nachweisgrenze im Bereich von 0,009 mg/m³ bis 0,093 mg/m³ und in der U02 von 0,034 mg/m³ bis 0,080 mg/m³.

Im Vergleich zu einer konventionellen Trocknungsanlage, die bei einer vergleichbaren Untersuchung eine Konzentration im Abgas nach thermischer Abluftbehandlung von 22 mg/m³ [11] aufwies, sind die Emissionen von Schwefeloxiden der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang wesentlich geringer. Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass bei konventionellen direkten Trocknungsanlagen in der Regel schwefelhaltige Brennstoffe fossilen oder biogenen Ursprungs zur Energiegewinnung für die Klärschlamm-trocknung oder thermischen Abluftbehandlung durch Nachverbrennung eingesetzt werden. Die bei der Verbrennung der schwefelhaltigen Brennstoffe verfahrensbedingten Schwefeloxid-Emissionen über die Abgase kommen bei der solaren Klärschlamm-trocknung nicht zum Tragen.

Etwaige, für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Beschränkungen für Schwefeloxide, wie 0,35 g/m³ gemäß der TA Luft [12] als auch 50 mg/m³ als Tagesmittelwert gemäß der für Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen geltenden 17. BImSchV [13], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang weit unterschritten.

5.2.2.1.7 Stickstoffoxide

Die Konzentrationen an Stickstoffoxiden in der Abluft, angegeben als Stickstoffdioxid, wurden in mehreren Perioden, verteilt über den mehrwöchigen Untersuchungszeitraum, in der U01 und U02 kontinuierlich gemessen. Die Auswertungen ergeben, dass sowohl in der U01 als auch in der U02 die Stickstoffoxidkonzentrationen unter der Nachweisgrenze (10,3 mg/m³) des eingesetzten Messverfahrens liegen.

Im Vergleich zu konventionellen Trocknungsanlagen, die bei vergleichbaren Untersuchungen durchschnittliche Konzentrationen in der Abluft bis 16 mg/m³ [10] und im Abgas nach thermischer Abluftbehandlung von 183 mg/m³ [11] aufwiesen, sind die Stickstoffoxidemissionen der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang gering. Dies lässt sich – analog der geringen Kohlenstoffmonoxid- und Schwefeloxidgehalte – damit erklären, dass bei konventionellen direkten Trocknungsanlagen in der Regel zur Energiegewinnung für den Trocknungsprozess bzw. Abluftbehandlung durch thermische Nachverbrennung fossile oder biogene Brennstoffe Verwendung finden. Die beim Verbrennungsvorgang verfahrensbedingt vorhandenen Stickstoffoxidemissionen über die Brennerabgase treten bei der solaren Klärschlamm-trocknung nicht auf.

Etwaige, für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Beschränkungen für Stickstoffoxide, wie 0,35 g/m³ gemäß der TA Luft [12] als auch 0,20 g/m³ als Tagesmittelwert gemäß der für Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen geltenden 17. BImSchV [13], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang sehr weit unterschritten.

5.2.2.1.8 Ammoniak

Die Ammoniak-Konzentrationen in der Abluft wurden diskontinuierlich, verteilt über den mehrwöchigen Untersuchungszeitraum, in der U01 an 15 Tagen und in der U02 an 6 Tagen durch einzelne Probenahmen bestimmt. In Tab. 9 sind für die einzelnen Messtage und Probenahmezeiträume die Konzentrationen an Ammoniak in der Abluft angegeben.

Die Abluft weist in der U01 und der U02 am Tag der Hallenbefüllung sowie an den der Hallenbefüllung folgenden Tag den höchsten Ammoniakgehalt auf. Über den Trocknungsverlauf nehmen in der U01 die Ammoniakgehalte in der Abluft von anfänglich 8,38 mg/m³ auf 0,29 mg/m³ ab. Zwischenzeitlich liegen in der U01 nur noch Ammoniakgehalte von 0,13 mg/m³ vor. Bei der U02 ist zu Beginn der Untersuchung, ausgehend von einem Ammoniakgehalt von 4,24 mg/m³, eine Abnahme auf 1,01 mg/m³ festzustellen, der sich allerdings bis zum Ende der Untersuchung wieder auf 3,41 mg/m³ erhöht.

Im Vergleich zu einer konventionellen Trocknungsanlage mit Biowäscher, die bei einer vergleichbaren Untersuchung Konzentrationen in der Abluft im Bereich von 1 bis 12 mg/m³ [10] aufwies, sind die Emissionen an Ammoniak an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang als anlagen-typisch einzuordnen.

Etwaige für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen relevante Beschränkungen für Ammoniak, wie 20 mg/m³ gemäß der TA Luft [12], werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Ehrwang erfüllt.

Tab. 9: Übersicht über die Ammoniakgehalte in der Abluft des Klärschlamm-trockners (Mittelwerte über den Probenahmezeitraum)

U01			U02		
Datum	Zeitraum	P2 NH ₃ mg/m ³	Datum	Zeitraum	P2 NH ₃ mg/m ³
11.09.01	15:10 – 16:10	8,38	04.03.02	15:00 – 17:00	4,24
12.09.01	12:15 – 14:15	7,32	05.03.02	12:00 – 14:00	4,04
12.09.01	14:30 – 16:30	6,49	25.03.02	15:35 – 17:35	1,01
13.09.01	08:15 – 11:15	3,79	27.03.02	13:00 – 15:00	1,04
18.09.01	14:05 – 15:05	0,97	09.04.02	14:45 – 16:45	2,38
18.09.01	17:05 – 18:05	0,90	10.04.02	13:45 – 15:45	3,41
19.09.01	13:30 – 14:30	0,90			
24.09.01	14:45 – 17:45	0,17			
25.09.01	16:15 – 18:15	0,13			
01.10.01	14:00 – 15:00	0,48			
01.10.01	17:00 – 18:00	0,61			
02.10.01	12:00 – 14:00	0,59			
08.10.01	14:45 – 16:45	0,17			
09.10.01	16:00 – 18:00	0,13			
15.10.01	14:15 – 16:15	0,16			
16.10.01	16:00 – 18:00	0,20			
29.10.01	14:50 – 16:50	0,24			
30.10.01	16:00 – 18:00	0,29			

5.2.2.1.9 Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Selen, Tellur, Thallium, Vanadium, Zinn und ihre Verbindungen

Die Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage wurde auf 15 Metalle und ihre Verbindungen untersucht. Die Tab. 10 bis 13 geben für eine Gruppe von 14 Metallen {Antimon (Sb), Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Nickel (Ni), Selen (Se), Tellur (Te), Thallium (Tl), Vanadium (V) und Zinn (Sn) mit ihren Verbindungen die staubgebundenen und filtergängigen Gehalte in der Abluft für die U01 und U02 wieder. Die Untersuchungsergebnisse von Quecksilber (Hg) sind wegen den abweichenden Probenahmezeiten aufgrund der separaten Probenahme für die filtergängigen Gehalte im nächsten Abschnitt aufgeführt.

Insgesamt liegen in der U01 und U02 bei den staubgebundenen und filtergängigen Metallen äußerst geringe Konzentrationen in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage vor (vgl. Tab. 10 bis 13). Der Vergleich der filtergängigen und staubgebundenen Metallanteile zeigt, dass im Rahmen der gegebenen Schwankungsbreite bei den einzelnen Metallgehalten die filtergängigen Anteile bei Antimon geringer, bei Blei, Cadmium und Kupfer ungefähr gleich und bei Nickel höher als die staubgebundenen Anteile sind. Für Arsen, Chrom, Kobalt, Mangan, Selen, Tellur, Thallium, Vanadium und Zinn lässt sich hingegen keine definitive Aussage treffen, da die Gehalte für die filtergängigen Anteile dieser Metalle unter der Nachweisgrenze des Analysenverfahrens liegen.

In Bezug auf die Anforderungen der TA Luft [12], die für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Klärschlamm-trocknungsanlagen anzuwenden sind, lassen sich folgende Aussagen treffen (vgl. Tab. 14):

Thallium liegt maximal mit einer Konzentration von $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (U01) bzw. $0,034 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (U02) vor. In beiden Untersuchungen sind damit die Gehalte um jeweils mehr als drei Größenordnungen unter dem in der TA Luft [12] für Thallium als staubförmigen anorganischen Stoff der Klasse I angegebenen Grenzwert von $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Weiter ergeben sich für die Gruppe der Metalle Blei, Kobalt, Nickel, Selen und Tellur als staubförmige anorganische Stoffe der Klasse II gemäß TA Luft [12] maximale Summengehalte im Bereich von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese Gehalte sind gegenüber dem Grenzwert von $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ [12] um mehr als zwei Größenordnungen geringer.

Die Metalle Antimon, Chrom, Kupfer, Mangan, Vanadium, Zinn aus der Klasse III der staubförmigen anorganischen Stoffe gemäß TA Luft [12] sind mit maximalen Summengehalten von $5,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (U01) bzw. $16,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (U02) in der Abluft enthalten. Der Grenzwert der TA Luft [12] von $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ wird damit um etwa zwei Größenordnungen unterschritten.

Die in der TA Luft als krebserregende Stoffe aufgeführten Metalle Arsen und Cadmium mit ihren Verbindungen unterschreiten mit maximalen Einzelgehalten unter $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und maximalen Summengehalten unter $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ den als Mindestanforderung vorgegebenen Wert von $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$ um zwei Größenordnungen.

In der U02 fällt bei den staubgebundenen Metallanteilen auf, dass zum Zeitpunkt der Hallenräumung am 12.04.2002 im Vergleich zum restlichen Untersuchungszeitraum wesentlich höhere staubgebundene Metallanteile vorliegen (vgl. Tab. 13). Dies lässt sich durch die höheren Staubemissionen während der Hallenräumung (vgl. Abschn. 5.2.2.3.2) erklären. Der vermehrte Austrag von feinem Klärschlammstaub bewirkt bei der Hallenräumung aufgrund der im Klärschlamm enthaltenen Metalle (vgl. Abschn. 5.2.1.2) einen Anstieg der staubgebundenen Metallanteile in der Hallenabluft.

Tab. 10: Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U01 (Mittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ über den Probenahmezeitraum für filtergängige Anteile)

U01	P2							Summe
Datum	Zeitraum	Tl	Pb	Co	Ni	Se	Te	Pb-Te
11.09.01	13:10 – 14:10	< 0,001	0,595	0,015	0,815	< 0,204	< 0,027	< 1,66
12.09.01	08:15 – 10:15	< 0,001	0,505	0,076	3,36	< 0,204	< 0,028	< 4,17
18.09.01	16:06 – 17:05	< 0,002	0,541	0,048	0,863	< 0,302	< 0,043	< 1,80
19.09.01	11:30 – 12:30	< 0,003	0,475	0,072	1,04	< 0,362	< 0,047	< 1,99
19.09.01	14:30 – 17:30	< 0,001	0,094	0,012	0,133	< 0,038	< 0,005	< 0,28
24.09.01	13:45 – 15:45	< 0,001	0,362	0,013	0,630	< 0,198	< 0,027	< 1,23
25.09.01	12:15 – 14:15	< 0,004	0,531	< 0,039	1,74	< 0,525	< 0,069	< 2,91
26.09.01	11:30 – 12:30	< 0,001	0,191	0,011	0,536	< 0,160	< 0,021	< 0,92
01.10.01	10:00 – 11:00	< 0,001	0,285	0,012	0,770	< 0,171	< 0,023	< 1,26
01.10.01	16:00 – 17:00	< 0,001	0,161	0,014	0,808	< 0,200	< 0,028	< 1,21
02.10.01	14:00 – 16:00	< 0,001	0,021	< 0,003	0,183	< 0,053	< 0,007	< 0,267
08.10.01	10:45 – 12:45	< 0,001	0,025	< 0,004	0,144	< 0,057	< 0,008	< 0,238
09.10.01	12:00 – 14:00	< 0,001	0,014	< 0,004	0,135	< 0,053	< 0,001	< 0,207
15.10.01	10:15 – 12:15	< 0,001	0,059	0,004	0,185	< 0,061	< 0,008	< 0,317
16.10.01	12:00 – 14:00	< 0,001	0,040	< 0,005	0,207	< 0,070	< 0,009	< 0,331
29.10.01	12:50 – 14:50	0,005	0,057	0,008	0,217	< 0,113	< 0,012	< 0,407
30.10.01	14:00 – 16:00	0,001	0,031	< 0,007	0,184	< 0,130	< 0,013	< 0,365
Maximum		0,005						< 4,17

Tab. 11: Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U01 (Mittelwerte in ng/m^3 über den Probenahmezeitraum für staubgebundene Anteile)

U01	P2							Summe
Datum	Zeitraum	Tl	Pb	Co	Ni	Se	Te	Pb-Te
11.09.01	11:10 – 18:10	0,182	41,2	0,89	62,6	< 3,6	< 0,5	< 109
12.09.01	08:15 – 16:30	0,036	50,2	1,10	60,6	< 5,1	< 0,7	< 118
13.09.01	08:15 – 11:15	0,163	175	4,85	170	< 17,7	< 2,4	< 370
18.09.01	12:35 – 18:05	< 0,033	47,1	3,92	57,0	< 5,0	< 0,7	< 114
19.09.01	08:30 – 17:30	< 0,015	7,8	0,40	16,1	< 2,2	< 0,3	< 27
20.09.01	08:10 – 11:10	0,067	43,0	1,48	62,6	< 7,0	< 0,9	< 115
24.09.01	11:45 – 17:45	0,045	32,7	0,54	43,6	< 5,1	< 0,7	< 83
25.09.01	08:15 – 18:15	0,021	8,3	0,48	16,6	< 2,3	< 0,3	< 28
26.09.01	08:30 – 12:30	< 0,036	17,0	0,57	45,7	< 5,4	< 0,7	< 69
01.10.01	10:00 – 18:00	< 0,014	33,6	0,89	46,2	< 2,0	< 0,3	< 83
02.10.01	08:00 – 18:00	< 0,008	9,5	0,24	12,1	< 1,2	< 0,2	< 23
Maximum		0,182						< 370

Tab. 10 (Forts.): Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U01 (Mittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ über den Probenahmezeitraum für filtergängige Anteile)

Sb	Cr	Cu	Mn	V	Sn	Summe	Cd	As	U01
						Sb-Sn			Datum
0,022	< 0,674	0,479	< 0,135	< 0,269	< 0,674	< 2,25	0,036	< 0,269	11.09.01
0,043	1,21	0,772	0,220	< 0,271	< 0,677	< 3,19	0,062	< 0,280	12.09.01
0,044	< 1,03	1,67	< 0,207	< 0,410	< 1,03	< 4,39	0,473	< 0,432	18.09.01
0,014	< 1,20	0,889	0,248	< 0,481	< 1,20	< 4,04	0,208	< 0,481	19.09.01
0,005	< 0,13	0,136	0,042	< 0,051	< 0,127	< 0,49	0,012	< 0,053	19.09.01
0,012	< 0,66	0,546	< 0,130	< 0,263	< 0,657	< 2,27	0,308	< 0,270	24.09.01
0,062	< 1,76	1,08	< 0,355	< 0,702	< 1,759	< 5,72	0,172	< 0,694	25.09.01
0,013	< 0,536	0,380	< 0,108	< 0,215	< 0,536	< 1,79	0,094	< 0,206	26.09.01
0,021	< 0,570	0,556	< 0,115	< 0,229	< 0,570	< 2,06	0,052	< 0,234	01.10.01
0,018	< 0,668	0,364	< 0,134	< 0,267	< 0,668	< 2,12	0,035	< 0,278	01.10.01
0,002	< 0,176	0,103	< 0,036	< 0,070	< 0,176	< 0,563	0,009	< 0,071	02.10.01
0,006	< 0,188	0,080	< 0,038	< 0,076	< 0,188	< 0,576	< 0,008	< 0,076	08.10.01
0,002	< 0,177	0,135	< 0,035	< 0,071	< 0,177	< 0,597	0,015	< 0,075	09.10.01
0,008	< 0,204	0,147	< 0,041	< 0,081	< 0,102	< 0,583	0,022	< 0,079	15.10.01
0,013	< 0,232	0,164	< 0,046	< 0,092	< 0,116	< 0,663	0,023	< 0,089	16.10.01
0,040	< 0,300	0,739	< 0,060	< 0,120	< 0,376	< 1,64	0,036	< 0,122	29.10.01
0,031	< 0,346	0,345	< 0,069	< 0,139	< 0,433	< 1,36	0,034	< 0,134	30.10.01
						< 5,72	0,473	< 0,694	Maximum

 Tab. 11 (Forts.): Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U01 (Mittelwerte in ng/m^3 über den Probenahmezeitraum für staubgebundene Anteile)

Sb	Cr	Cu	Mn	V	Sn	Summe	Cd	As	U01
						Sb-Sn			Datum
1.620	49,3	99	70,7	< 4,7	30,8	< 1.870	1,20	< 4,7	11.09.01
669	86,5	1.980	98,1	< 6,9	29,3	< 2.870	1,10	< 6,9	12.09.01
2.740	222	374	555	< 23,7	63,9	< 3.980	4,33	< 23,7	13.09.01
250	97,1	2.020	76,3	< 6,7	< 16,7	< 2.460	1,54	< 6,7	18.09.01
331	21,5	48	25,6	< 2,9	< 7,4	< 436	0,47	< 2,9	19.09.01
473	81,3	177	117	< 9,3	82,2	< 940	0,94	< 9,3	20.09.01
848	63,3	113	60,3	< 6,9	< 17,1	< 1.110	< 0,69	< 6,9	24.09.01
414	21,2	73	33,3	< 3,1	< 7,7	< 552	< 0,31	< 3,1	25.09.01
541	55,9	115	58,8	< 7,3	< 18,2	< 796	< 0,73	< 7,3	26.09.01
70	32,4	136	22,6	< 2,7	39,6	< 303	< 0,27	< 2,7	01.10.01
40	18,1	59	16,8	< 1,6	< 4,0	< 140	11,7	< 1,7	02.10.01
						< 3.980	11,7	< 23,7	Maximum

Tab. 12: Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U02 (Mittelwerte in µg/m³ über den Probenahmezeitraum für filtergängige Anteile)

U02 Datum	P2 Zeitraum	Tl	Pb	Co	Ni	Se	Te	Summe Pb-Te
04.03.02	10:45 – 13:00	< 0,001	0,197	< 0,008	0,730	< 0,122	< 0,016	< 1,07
05.03.02	14:00 – 16:00	< 0,001	0,202	< 0,008	0,564	< 0,119	< 0,016	< 0,91
26.03.02	12:00 – 14:00	< 0,002	0,415	< 0,016	1,06	< 0,244	< 0,032	< 1,77
27.03.02	11:00 – 13:00	< 0,001	0,306	< 0,013	1,08	< 0,188	< 0,025	< 1,61
10.04.02	11:45 – 13:45	< 0,001	0,139	< 0,013	1,27	< 0,199	< 0,026	< 1,65
11.04.02	12:30 – 14:00	0,034	0,470	< 0,032	3,12	< 0,487	< 0,065	< 4,17
12.04.02*)	09:08 – 09:47	< 0,002	0,105	< 0,019	1,62	< 0,289	< 0,037	< 2,07
Maximum**)		0,034						< 4,17

*) Räumung der Trockenhalle 1

**) ohne Berücksichtigung der Hallenräumung

Tab. 13: Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U02 (Mittelwerte in ng/m³ über den Probenahmezeitraum für staubgebundene Anteile)

U02 Datum	P2 Zeitraum	Tl	Pb	Co	Ni	Se	Te	Summe Pb-Te
04.03.02	10:45 – 17:00	0,073	195	1,86	86,0	< 5,1	< 0,7	< 289
05.03.02	08:00 – 18:00	0,140	146	0,47	29,3	< 2,7	< 0,4	< 179
06.03.02	10:00 – 14:00	0,067	168	0,81	55,7	< 4,3	< 0,6	< 229
25.03.02	11:40 – 17:35	< 0,057	769	4,16	192	< 8,5	< 1,1	< 975
26.03.02	10:00 – 18:00	< 0,043	277	1,15	72,4	< 6,4	< 0,9	< 358
27.03.02	09:00 – 15:00	< 0,044	325	1,58	117	< 6,7	< 0,9	< 451
09.04.02	10:45 – 15:45	0,228	459	15,0	179	< 8,2	< 1,1	< 662
10.04.02	09:45 – 17:40	0,228	440	10,7	143	< 10,5	< 1,4	< 606
11.04.02	11:00 – 16:00	< 0,136	657	8,53	448	< 20,4	13,82	< 1.150
12.04.02*)	09:08 – 09:47	3,08	1.900	215	935	84,8	< 4,1	< 3.140
Maximum**)		0,228						< 1.150

*) Räumung der Trockenhalle 1

**) ohne Berücksichtigung der Hallenräumung

Tab. 14: Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U01 und U02 (Maximalgehalte in den Probenahmezeiträumen für filtergängige und staubgebundene Anteile ohne Berücksichtigung der Hallenräumung)

P2	Einheit	Tl	Summe Pb, Co, Ni, Se, Te	Summe Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn	Summe As, Cd, Co
U01 filtergängig + staubgebunden	µg/m³	0,005	< 4,54	< 9,7	< 0,99
U02 filtergängig + staubgebunden	µg/m³	0,034	< 5,32	< 16,2	< 1,46
TA Luft [12]	µg/m³	50	500	1.000*)	50**)

*) Summe Sb, Cr, CN, F, Cu, Mn, V, Sn

**) Summe As, Benzo(a)pyren, Cd, Co, Cr(VI)

Tab. 12 (Forts.): Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U02 (Mittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ über den Probenahmezeitraum für filtergängige Anteile)

Sb	Cr	Cu	Mn	V	Sn	Summe Sb-Sn	Cd	As	U02 Datum
0,049	< 0,408	0,71	< 0,082	< 0,163	< 0,408	< 1,87	0,051	< 0,163	04.03.02
0,031	< 0,397	0,90	< 0,079	< 0,159	< 0,397	< 1,97	0,276	< 0,159	05.03.02
0,067	< 0,812	3,35	< 0,162	< 0,325	< 0,812	< 5,53	0,327	< 0,325	26.03.02
0,149	< 0,627	1,17	< 0,125	< 0,251	< 0,627	< 2,95	0,065	< 0,251	27.03.02
0,036	< 0,662	1,19	< 0,132	< 0,265	< 0,662	< 2,95	0,058	< 0,265	10.04.02
0,122	< 1,66	4,76	< 0,325	< 0,650	< 1,63	< 9,11	0,032	< 0,650	11.04.02
0,043	< 0,963	0,84	< 0,193	< 0,385	< 0,963	< 3,40	0,004	< 0,385	12.04.02 ^{*)}
						< 9,11	0,327	< 0,65	Maximum ^{**)}

^{*)} Räumung der Trockenhalle 1

^{**)} ohne Berücksichtigung der Hallenräumung

 Tab. 13 (Forts.): Übersicht über die Metallgehalte in der Abluft während der U02 (Mittelwerte in ng/m^3 über den Probenahmezeitraum für staubgebundene Anteile)

Sb	Cr	Cu	Mn	V	Sn	Summe Sb-Sn	Cd	As	U02 Datum
719	102	426	70,9	< 6,8	< 17,0	< 1.340	20,5	15,8	04.03.02
632	44,5	302	45,6	< 3,6	42,4	< 1.070	2,33	< 3,6	05.03.02
657	39,3	484	62,3	< 5,7	436	< 1.680	9,32	20,9	06.03.02
657	172	596	121	< 11,3	34,4	< 1.590	45,3	< 11,3	25.03.02
950	170	348	59,1	< 8,6	40,7	< 1.580	10,7	< 8,6	26.03.02
522	222	616	68,8	< 8,9	< 22,0	< 1.460	11,7	< 8,9	27.03.02
720	270	1.510	574	24,0	53,0	3.150	17,8	< 10,9	09.04.02
924	1.080	1.020	461	19,1	60,0	3.570	59,2	44,1	10.04.02
1.260	192	5.210	369	< 27,2	< 67,9	< 7.130	649	89,3	11.04.02
1.710	1.320	14.800	8.450	393	654	27.360	70,3	100	12.04.02 ^{*)}
						< 7.130	649	89,3	Maximum ^{**)}

^{*)} Räumung der Trockenhalle 1

^{**)} ohne Berücksichtigung der Hallenräumung

5.2.2.1.10 Quecksilber und seine Verbindungen

Das filtergängige Quecksilber lag an allen Probenahmetagen in der U01 und U02 immer unter der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Eine Bestimmung des staubgebundenen Quecksilbers in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage wurde nur in der U02 vorgenommen (vgl. Tab. 15). Auch die staubgebundenen Quecksilbergehalte sind in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage sehr gering und liegen zumeist unter der Nachweisgrenze des verwendeten Probenahme- und Analysenverfahrens. So befindet sich das staubgebundene Quecksilber in der U02 in einem Konzentrationsbereich zwischen $< 0,001 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $0,004 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tab. 15: Übersicht über die Quecksilbergehalte in der Abluft des Klärschlamm-trockners (Mittelwerte über den Probenahmezeitraum, staubgebundene Anteile) während der U01 und der U02

U02		P2
Datum	Zeitraum	Hg $\mu\text{g}/\text{m}^3$
04.03.02	10:45 – 17:00	0,003
05.03.02	08:00 – 18:00	0,004
06.03.02	10:00 – 14:00	0,004
25.03.02	11:40 – 17:35	< 0,001
26.03.02	10:00 – 18:00	< 0,001
27.03.02	09:00 – 15:00	< 0,001
09.04.02	10:45 – 15:45	< 0,001
10.04.02	09:45 – 17:40	< 0,001
11.04.02	11:00 – 16:00	< 0,001
12.04.02 ^{*)}	09:08 – 09:47	< 0,001

^{*)} Räumung der Trocknungshalle 1

Eine Abschätzung des Gesamtgehalts an Quecksilber zeigt, dass mit einem Maximalwert von $< 0,015 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der in der TA Luft [12] für Quecksilber als staubförmiger anorganischer Stoff der Klasse I angegebene Grenzwert von $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$ um mehr als drei Größenordnungen unterschritten wird.

5.2.2.2 Organische Komponenten

5.2.2.2.1 Organische Stoffe

Die Gehalte an organischen Stoffen (ausgenommen staubförmige organische Stoffe) in der Abluft – angegeben als Gesamtkohlenstoff – wurden, verteilt über die mehrwöchigen Untersuchungszeiträume, in mehreren Perioden in der U01 und U02 kontinuierlich gemessen. In Tab. 16 sind für die einzelnen Messzeiträume die durchschnittlichen Gesamtkohlenstoff-Konzentrationen angegeben.

In der Abluft sind unmittelbar nach der Befüllung der Trocknungshalle die höchsten Gesamtkohlenstoffgehalte festzustellen, die über den Trocknungsverlauf mit der Belüftung des Klärschlammes über die automatische Wendeeinrichtung abnehmen. In der U01 reduzieren sich die Gesamtkohlenstoffgehalte von durchschnittlich $7,97 \text{ mg}/\text{m}^3$ auf $0,95 \text{ mg}/\text{m}^3$. Da bei der U02 der Anfangswert an organischen Stoffen bei der Befüllung der Trocknungshalle 1 – bedingt durch den Ausfall eines Messgeräts – nicht ermittelt werden konnte, wurde bei der Neubefüllung der Trocknungshalle 1 im Anschluss an die U02 eine Ersatzmessung durchgeführt. Hierbei ergab sich ein durchschnittlicher Gehalt von $8,01 \text{ mg}/\text{m}^3$ an Gesamtkohlenstoff. Dieser ist im Vergleich zum Maximalwert der U02, der bei Räumung am 12.04.2002 mit $2,28 \text{ mg}/\text{m}^3$ ermittelt wurde, etwa vierfach höher.

In Abb. 15 sind für die Messzeiten der Tab. 16 die Gesamtkohlenstoffgehalte als Häufigkeitsverteilungen der Halbstundenmittelwerte dargestellt.

Wie die Maxima der Häufigkeitsverteilungen zeigen, liegen in beiden Untersuchungen die organischen Stoffe zumeist in einem niedrigen Konzentrationsbereich zwischen $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $2,0 \text{ mg}/\text{m}^3$ vor. Die geringere Schwankungsbreite und das Fehlen der höheren Gesamtkohlenstoffgehalte in der Häufigkeitsverteilung der Halbstundenmittelwerte der U02 sind ursächlich auf die Nichterfassung der Gesamtkohlenstoffgehalte zu Beginn der U02 zurückzuführen.

Aus der Auswertung der Halbstundenmittelwerte folgt für die U01 ein durchschnittlicher Gesamtkohlenstoffgehalt von $3,18 \text{ mg}/\text{m}^3$, ein Minimum von $0,15 \text{ mg}/\text{m}^3$ und ein Maximum von

Tab. 16: Übersicht über die Gesamtkohlenstoff-Konzentrationen in der Abluft des Klärschlamm-trockners (Mittelwerte über den Messzeitraum) während der U01 und der U02

U01			U02		
Beginn	Ende	P2	Beginn	Ende	P2
Datum, Uhrzeit	Datum, Uhrzeit	C _{ges} mg/m ³	Datum, Uhrzeit	Datum, Uhrzeit	C _{ges} mg/m ³
11.09.01, 08:12	13.09.01, 11:40	7,97			
18.09.01, 13:40	20.09.01, 12:29	4,46	04.03.02, 15:06	06.03.02, 13:58	1,46
24.09.01, 12:10	26.09.01, 13:32	3,20	25.03.02, 13:55	27.03.02, 15:03	1,37
01.10.01, 11:45	02.10.01, 17:00	2,13	09.04.02, 16:37	12.04.02, 15:59	2,06
08.10.01, 11:17	10.10.01, 12:21	1,93	12.04.02, 09:00	12.04.02, 10:00	2,28 ^{*)}
15.10.01, 11:05	17.10.01, 12:52	1,47	12.04.02, 10:00	12.04.02, 11:30	8,01 ^{**)}
30.10.01, 14:06	31.10.01, 12:21	0,95			

^{*)} Räumung der Trocknungshalle 1

^{**)} Neubefüllung der Trocknungshalle 1

15,99 mg/m³. In der U02 beträgt der durchschnittliche Gesamtkohlenstoffgehalt 1,61 mg/m³ bei einem Minimum von < 0,1 mg/m³ und einem Maximum von 6,95 mg/m³.

Zur Veranschaulichung des zeitlichen Konzentrationsverlaufs der organischen Stoffe in der Abluft der Trocknungshalle 1 sind in den Abb. 16 und 17 für die U01 und U02 die aus den Halbstundenmittelwerten berechneten Tagesmittelwerte über den jeweiligen Untersuchungszeitraum grafisch dargestellt.

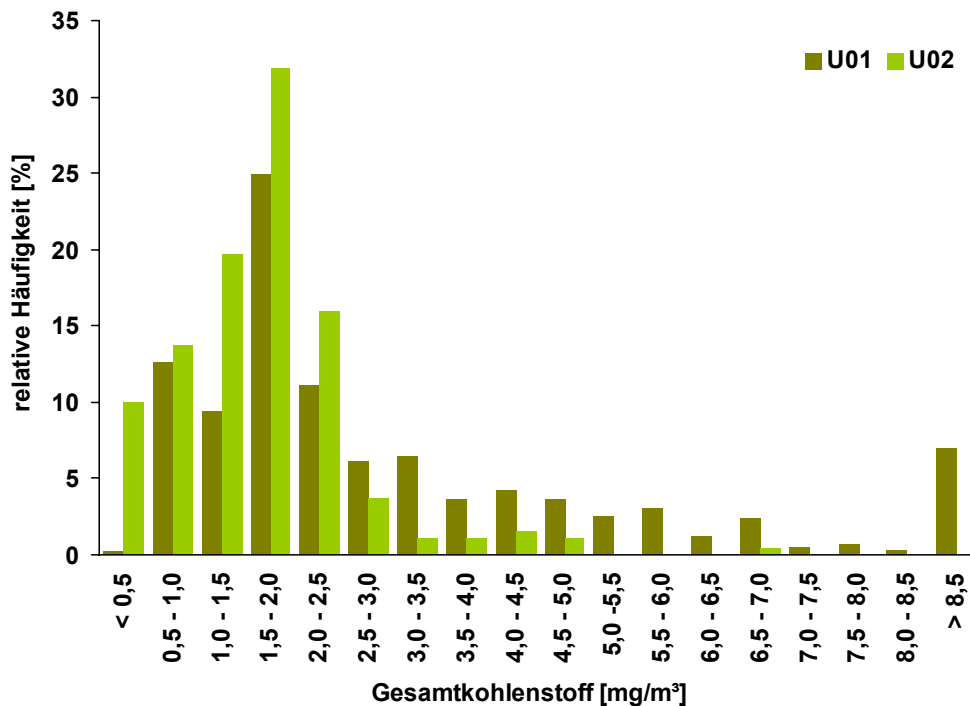


Abb. 15: Häufigkeitsverteilungen der Gesamtkohlenstoffgehalte während der messtechnisch erfassten Trocknungszeiten (unnormierte Halbstundenmittelwerte) in der Abluft während der U01 und der U02

Während in Abb.16 für die U01 eine kontinuierliche Abnahme der Gesamtkohlenstoffgehalte bei den Tagesmittelwerten zu verzeichnen ist, weist die U02 in Abb. 17 einen nahezu konstanten Konzentrationsverlauf auf. Hierbei ist jedoch wiederum zu beachten, dass bei der U02, wie bereits erläutert, die Anfangsemissionen an organischen Stoffen nicht erfasst werden konnten. Trotz des unbekanntem Anfangswerts lässt sich aus dem Vergleich der Konzentrationsverläufe für die U01 und U02 erkennen, dass bereits zwei Wochen nach Befüllung der Trocknungshalle die Höhe des Gesamtkohlenstoffgehalts in der U02 nur etwa die Hälfte des Gesamtkohlenstoffgehalts der U01 beträgt.

Die Tagesmittelwerte für die Gesamtkohlenstoffgehalte liegen in der U01 im Bereich zwischen 0,82 mg/m³ und 8,55 mg/m³ (durchschnittlicher Wert von 3,18 mg/m³) und in der U02 im Bereich zwischen 0,76 mg/m³ und 2,40 mg/m³ (durchschnittlicher Wert von 1,64 mg/m³).

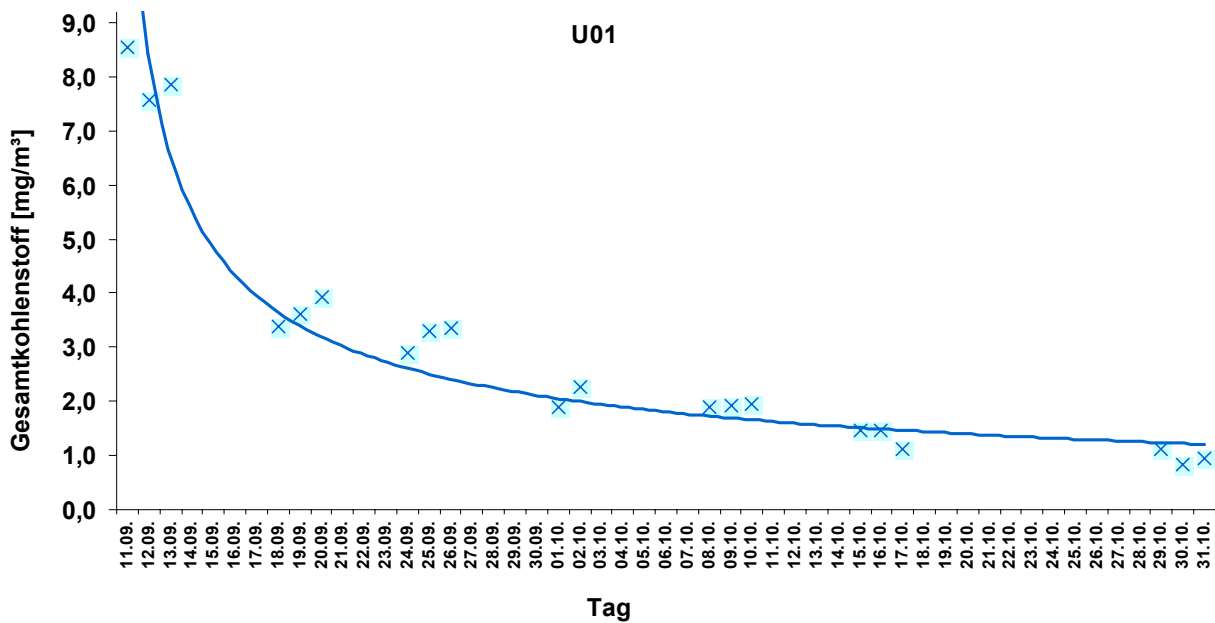


Abb. 16: Darstellung der unnormierten organischen Gesamtkohlenstoffgehalte (Tagesmittelwerte) in der Abluft während der U01

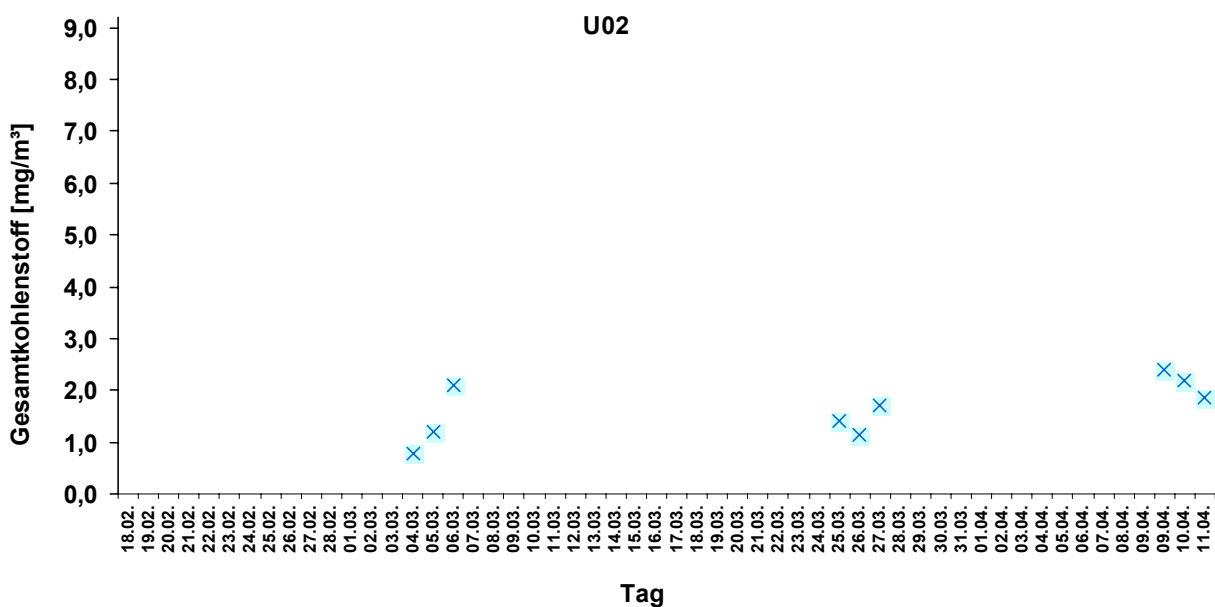


Abb. 17: Darstellung der unnormierten organischen Gesamtkohlenstoffgehalte (Tagesmittelwerte) in der Abluft während der U02

Der in der TA Luft [12] für organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff, vorgegebene Wert von 20 mg/m³ wird sowohl in der U01 und U02 eingehalten. Ebenso wird der zulässige Halbstundenmittelwert von 20 mg/m³ und Tagesmittelwert von 10 mg/m³ der 17. BImSchV [13] für organischen Gesamtkohlenstoff bei beiden Untersuchungen nicht überschritten.

5.2.2.2 Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane

Die Untersuchungsergebnisse der polychlorierten Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) in der Abluft – ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen – sind in Tab. 17 aufgeführt. Die Abb. 18 zeigt darüber hinaus die aus den Einzelkongeneren gebildeten PCDD/F-Summengehalte, bei denen für Einzelkongenergehalte unter der Bestimmungsgrenze die halbe Bestimmungsgrenze als Konzentrationswert berücksichtigt wurde.

Insgesamt liegen in beiden Untersuchungen in der Abluft sehr geringe PCDD/F-Gehalte - in der Regel unter 0,5 pg I-TE/m³ - vor. Mit einem mittleren PCDD/F-Gehalt von 0,08 pg I-TE/m³ weist die Abluft in der U01 einen um durchschnittlich 0,40 pg I-TE/m³ niedrigen PCDD/F-Gehalt als in der U02 (0,48 pg I-TE/m³) auf. Der in der TA Luft [12] vorgegebene Grenzwert von 0,1 ng I-TE/m³ wird damit sowohl in der U01 mit einem PCDD/F-Gehalt von maximal 0,25 pg I-TE/m³ als auch in der U02 mit maximal 1,72 pg I-TE/m³ unterschritten.

Zu Beginn der U01 liegen mit 0,24 pg I-TE/m³ bzw. 0,25 pg I-TE/m³ die höchsten PCDD/F-Gehalte in der Abluft vor. Diese gehen im Verlauf der Untersuchung zwischenzeitlich bis auf Gehalte von 0,01 pg I-TE/m³ bzw. kleiner 0,01 pg I-TE/m³ zurück.

Im Unterschied zur U01 ist bei der U02 über den Verlauf des Trocknungsprozesses eine Zunahme der PCDD/F-Konzentrationen von 0,04 pg I-TE/m³ bzw. 0,06 pg I-TE/m³ auf 0,36 pg I-TE/m³ bis 0,50 pg I-TE/m³ festzustellen. Der höchste PCDD/F-Gehalt tritt am 12.04.2002 mit 1,72 pg I-TE/m³ während der Probenahme im Zeitraum der Hallenräumung auf. Dieser ist vermutlich auf die im Vergleich zur restlichen Untersuchung höheren Staubemissionen (vgl. Abschn. 5.2.2.3.2) während dieser speziellen Betriebsphase zurückzuführen; die im Klärschlamm enthaltenen Dioxine/Furane werden staubgebunden über die Abluft emittiert.

Tab. 17: Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (Summengehalte ohne Bestimmungsgrenzen für Einzelkongeneren) in der Abluft während der U01 und der U02

U01			U02		
Datum	Zeitraum	P2 PCDD/F pg I-TE/m ³	Datum	Zeitraum	P2 PCDD/F pg I-TE/m ³
11.09.2001	11:00 – 17:00	0,24	04.03.2002	11:05 – 17:00	0,06
12.09.2001	11:25 – 17:25	0,25	05.03.2002	08:00 – 14:00	0,04
18.09.2001	11:50 – 17:50	0,05	25.03.2002	11:30 – 17:30	0,27
19.09.2001	08:30 – 14:30	0,08	26.03.2002	10:00 – 16:00	0,50
24.09.2001	11:45 – 17:45	0,05	09.04.2002	11:00 – 16:50	0,36
25.09.2001	08:15 – 12:35	0,01	10.04.2002	08:20 – 14:20	0,42
01.10.2001	09:45 – 15:45	0,01	12.04.2002	09:05 – 09:45	1,72 ^{*)}
02.10.2001	10:45 – 16:45	0,01			
08.10.2001	10:45 – 16:45	0,18			
09.10.2001	08:00 – 14:00	0,03			
15.10.2001	10:30 – 16:30	0,05			
16.10.2001	08:00 – 14:00	0,07			
29.10.2001	10:40 – 16:40	< 0,01			
30.10.2001	07:55 – 13:55	0,06			

^{*)} Räumung der Trocknungshalle 1

Zur Veranschaulichung der Konzentrationsverhältnisse sowie der Verteilung der Einzelkongenere sind in Abb. 18 die Gehalte der 17 PCDD/F-Kongenere, die die PCDD/F-Summengehalte bilden, grafisch dargestellt. Hierbei wurde für Kongenere, deren Gehalte unter der Bestimmungsgrenze lagen, als Konzentrationswert die halbe Bestimmungsgrenze angenommen.

Wie Abb. 18 verdeutlicht, ergeben sich aus den relativen Anteilen der Einzelkongenere an den PCDD/F-Gesamttoxizitätsäquivalenten ähnliche Verteilungsmuster:

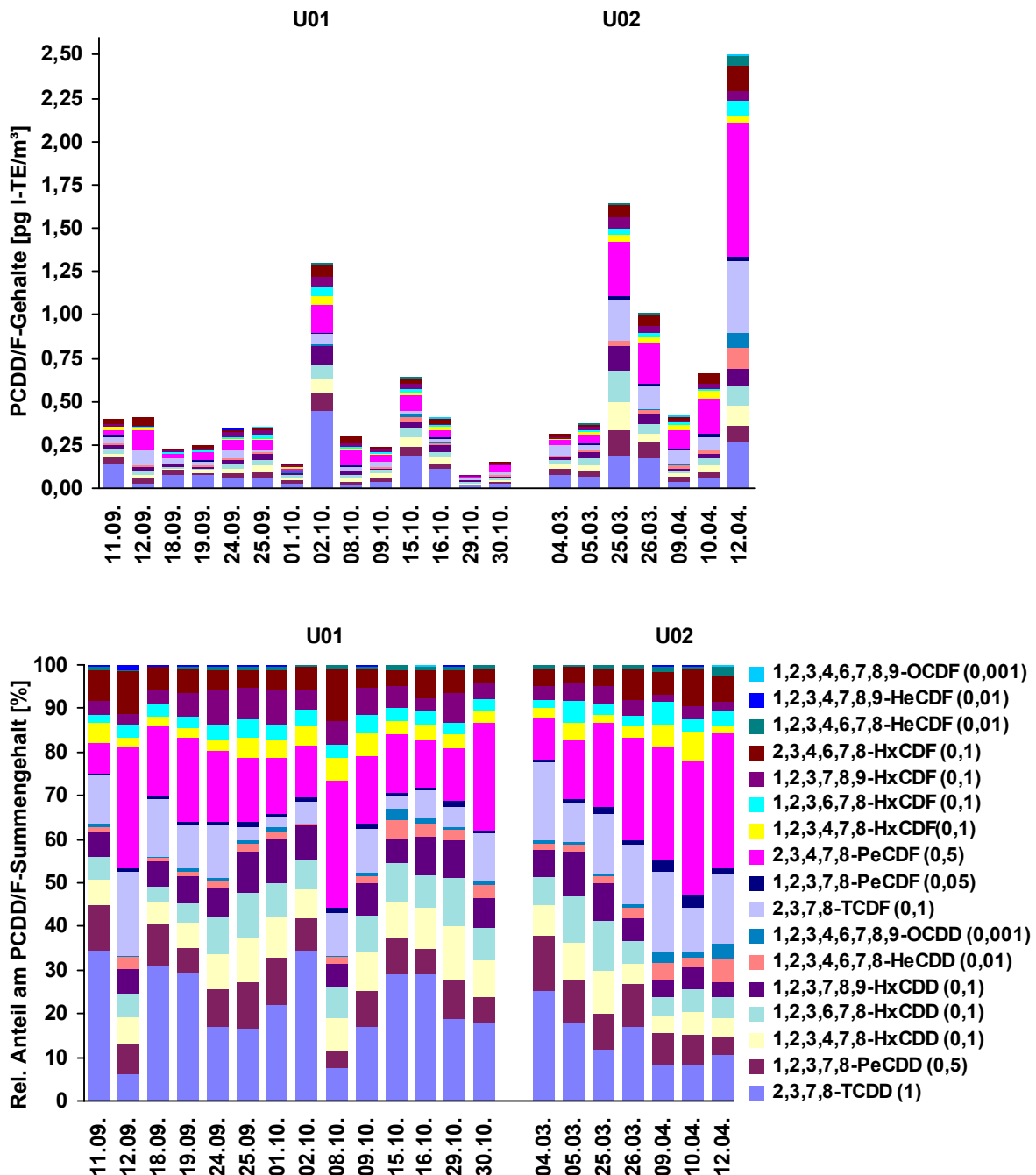


Abb. 18: Darstellung der PCDD/F-Gehalte (Summe und Einzelkongenere) {alle Angaben als internationale Toxizitätsäquivalente (I-TE) gemäß Anhang der 17. BImSchV [13]} sowie der PCDD/F-Einzelkongenergehalte als relative Anteile an den PCDD/F-Summengehalten in der Abluft während der U01 und der U02 (unter Berücksichtigung der halben Bestimmungsgrenzen)

So werden die Hauptanteile in der Abluft in beiden Betriebsweisen vom Kongener 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin mit relativen Anteilen von 6 % bis 35 %, gefolgt von den Kongeneren 2,3,4,7,8-Pentachlordibenzofuran (7 % bis 31 %) und 2,3,7,8-Tetrachlordibenzofuran (3 % bis 19 %), bestimmt.

5.2.2.2.3 Polychlorierte Biphenyle

Die Bestimmung der polychlorierten Biphenyle (PCB) in der Abluft erfolgte aus der Probe zur Bestimmung der polychlorierten Dibenzodioxine und -furane.

In Tab. 18 und Abb. 19 sind die für jede Abluftprobe ermittelten PCB-Gehalte als Summenwerte der sechs PCB-Kongeneren 2,4,4'-Trichlorbiphenyl, 2,2',5,5'-Tetrachlorbiphenyl, 2,2',4,5,5'-Pentachlorbiphenyl, 2,2',3,4,5,5'-Hexachlorbiphenyl, 2,2',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl und 2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorbiphenyl (entspricht PCB Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 nach [15]) aufgeführt.

In der Abluft liegt in der U01 mit durchschnittlich 5,84 ng/m³ ein annähernd vierfach geringerer PCB-Gehalt als in der U02 mit durchschnittlich 23,0 ng/m³ vor. Die PCB-Gehalte schwanken in der U01 im Bereich zwischen 1,73 ng/m³ und 13,1 ng/m³, bleiben aber über den Verlauf des Trocknungsprozesses in einem vergleichbaren Bereich. Bei der U02 zeigen sich zu Beginn der Trocknung am 04. und 05.03.2002 mit Einzelgehalten von 4,96 ng/m³ und 4,79 ng/m³ zunächst PCB-Werte, die sich auf Höhe des durchschnittlichen PCB-Gehalts der U01 befinden. Im weiteren Verlauf steigen die Gehalte auf das Vierfache und ein Konzentrationsniveau im Bereich zwischen 19,1 ng/m³ und 22,6 ng/m³ an. Der mit Abstand höchste PCB-Gehalt von 73,2 ng/m³ liegt – analog zum maximalen PCDD/F-Gehalt (vgl. Abschn. 5.2.2.2.2) – am 12.04.2002 während der Räumung der Trocknungshalle in der U02 vor. Wie bereits in Abschn. 5.2.2.2.2 ausführlich erläutert, steht dies vermutlich in unmittelbarem Zusammenhang mit den erhöhten Staubemissionen während dieser Betriebsphase. Dies wird auch durch den Vergleich der in Abb. 19 als relative Anteile am PCB-Summengehalt dargestellten Einzelkongenergehalte der Abluft mit den relativen Anteilen im Klärschlamm (vgl. Abschn. 5.2.1.3) aufgrund des ähnlichen Verteilungsmusters bestätigt.

Tab. 18: Polychlorierte Biphenyle in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang während der U01 und der U02; n.b.: nicht bestimmt

U01			U02		
Datum	Zeitraum	P2 PCB ng/m ³	Datum	Zeitraum	P2 PCB ng/m ³
11.09.2001	11:00 – 17:00	8,76	04.03.2002	11:05 – 17:00	4,96
12.09.2001	11:25 – 17:25	13,1	05.03.2002	08:00 – 14:00	4,79
18.09.2001	11:50 – 17:50	3,34	25.03.2002	11:30 – 17:30	19,1
19.09.2001	08:30 – 14:30	4,74	26.03.2002	10:00 – 16:00	19,0
24.09.2001	11:45 – 17:45	7,23	09.04.2002	11:00 – 16:50	22,6
25.09.2001	08:15 – 12:35	9,93	10.04.2002	08:20 – 14:20	17,3
01.10.2001	09:45 – 15:45	3,56	12.04.2002	09:05 – 09:45	73,2 ^{*)}
02.10.2001	10:45 – 16:45	8,02			
08.10.2001	10:45 – 16:45	n.b.			
09.10.2001	08:00 – 14:00	6,63			
15.10.2001	10:30 – 16:30	4,01			
16.10.2001	08:00 – 14:00	8,76			
29.10.2001	10:40 – 16:40	1,73			
30.10.2001	07:55 – 13:55	1,94			

^{*)} Räumung der Trocknungshalle 1

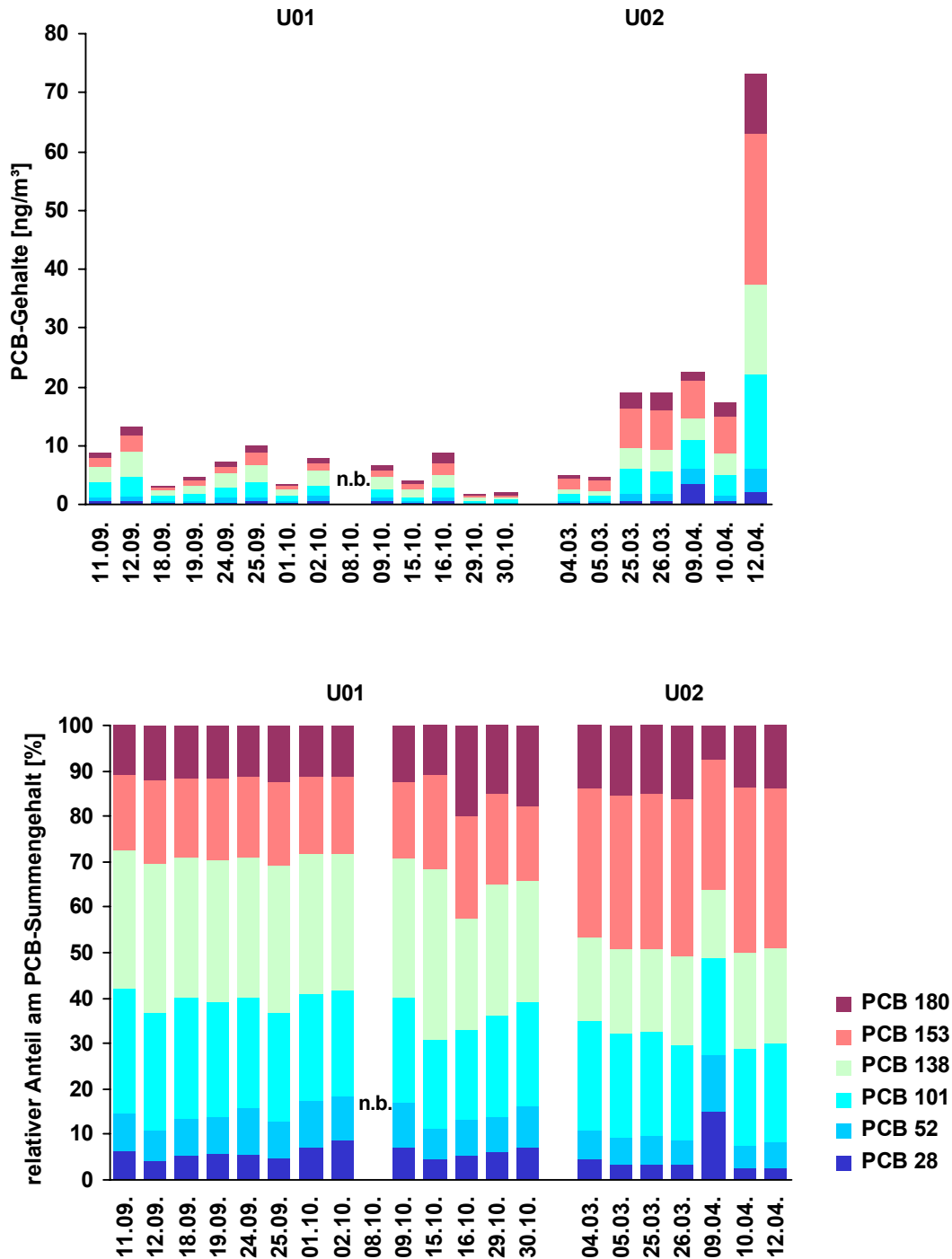


Abb. 19: Darstellung der Einzelkongenergehalte der PCB Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 (nach [15]) und deren Summen sowie deren relative Anteile an den PCB-Summengerhalten in der Abluft während der U01 und der U02; n.b.: nicht bestimmt

Die Abb. 19 zeigt weiter, dass die PCB-Einzelkongenergehalte in der Abluft in beiden Untersuchungen einen vergleichbaren prozentualen Beitrag zum PCB-Summengerhalt liefern. Zwischen der U01 und U02 ergeben sich jedoch geringfügige Unterschiede in den Verteilungsmustern, was vor allem auf den höheren Anteil an PCB Nr. 153 und geringeren Anteil an PCB Nr. 138 am PCB-Summengerhalt in der U02 gegenüber der U01 zurückzuführen ist.

Im Einzelnen tragen die Kongenere mit folgenden Anteilen zum Summengehalt bei:

	U01	U02
Nr. 28	4,1 % bis 8,5 %,	2,6 % bis 14,9 %,
Nr. 52	6,9 % bis 10,3 %,	4,9 % bis 12,6 %,
Nr. 101	19,4 % bis 27,6 %,	21,2 % bis 24,0 %,
Nr. 138	16,5 % bis 22,8 %,	15,3 % bis 21,1 %,
Nr. 153	24,4 % bis 37,6 %,	28,4 % bis 36,5 %,
Nr. 180	10,8 % bis 19,8 %,	7,5 % bis 16,2 %.

5.2.2.2.4 Polychlorierte Benzole

Die Untersuchungsergebnisse auf polychlorierte Benzole (PCBz) in der Abluft der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang sind in Tab. 19 und in Abb. 20 aufgeführt. Die PCBz-Gehalte sind als Summengehalte der Tri-, Tetra-, Penta- und Hexachlorbenzole angegeben; Mono- und Dichlorbenzole waren aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit bei dem gewählten Aufarbeitungs-verfahren nicht bestimmbar.

Die Abluft weist in der U02 mit PCBz-Gehalten von 28,0 ng/m³ bis 203,3 ng/m³ eine verhältnismäßig große Schwankungsbreite auf.

In Abb. 20 sind zur Veranschaulichung der PCBz-Konzentrationsverhältnisse in der Abluft die Gehalte der Kongenere unterschiedlichen Chlorierungsgrads als Summengehalte sowie als relative Anteile am Summengehalt (Verteilungsmuster) für die U02 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass – wie schon bei den PCDD/F und PCB (vgl. Abschn. 5.2.2.2.2 und 5.2.2.2.3) – die höchsten Emissionen bei der Räumung der Trocknungshalle 1 auftreten.

Tab. 19: Übersicht über die Gehalte an polychlorierten Benzolen (ohne Mono-, Dichlorbenzole) in der Abluft während der U02

U02	P2	
Datum	Zeitraum	PCBz ng/m ³
04.03.2002	11:05 – 17:00	34,7
05.03.2002	08:00 – 14:00	28,0
25.03.2002	11:30 – 17:30	138,2
26.03.2002	10:00 – 16:00	93,4
09.04.2002	11:00 – 16:50	59,9
10.04.2002	08:20 – 14:20	57,5 ^{*)}
12.04.2002	09:05 – 09:45	203,3 ^{*) **)}

^{*)} ohne Trichlorbenzole (aufgrund analytischer Probleme nicht auswertbar)

^{**)} Räumung der Trocknungshalle 1

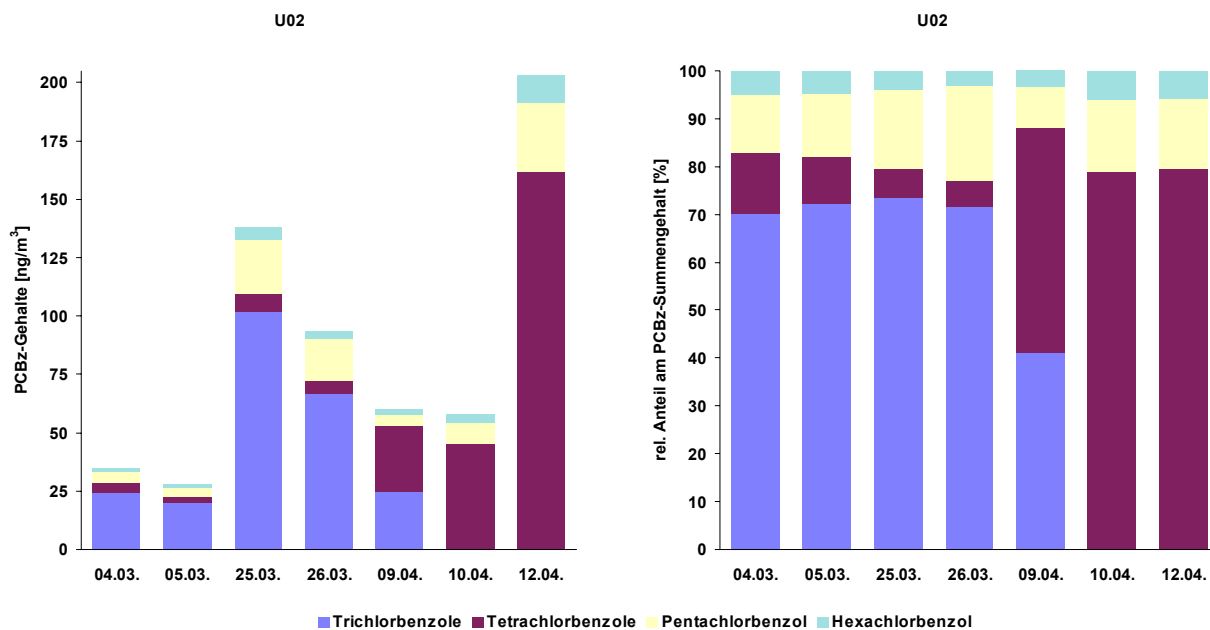


Abb. 20: Darstellung der Einzelgehalte der Tri- und Tetrachlorbenzole sowie des Penta- und Hexachlorbenzols und deren Summen sowie deren relative Anteile an den PCBz-Summengehalten in der Abluft während der U02

5.2.2.2.5 Polychlorierte Phenole

Die Tab. 20 und Abb. 21 geben die Gehalte an polychlorierten Phenolen (PCPh) in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang wieder. Die Gehalte sind als Summenwerte der Mono-, Di-, Tri-, Tetrachlorphenole sowie von Pentachlorphenol angegeben.

Wie die PCPh-Gehalte verdeutlichen, treten sowohl in der U01 als auch U02 deutliche Schwankungen der PCPh-Konzentrationen in der Abluft auf. Ein Trend im Konzentrationsverlauf lässt sich aufgrund der großen Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Einzelwerten über den Verlauf des

Tab. 20: Polychlorierte Phenole in der Abluft der Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang während der U01 und die U02 (ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen)

U01			U02		
Datum	Zeitraum	Trocknerabluft PCPh ng/m³	Datum	Zeitraum	Trocknerabluft PCPh ng/m³
11.09.2001	11:00 – 17:00	28	04.03.2002	11:05 – 17:00	11
12.09.2001	11:25 – 17:25	59	05.03.2002	08:00 – 14:00	7
18.09.2001	11:50 – 17:50	26	25.03.2002	11:30 – 17:30	23
19.09.2001	08:30 – 14:30	24	26.03.2002	10:00 – 16:00	17
24.09.2001	11:45 – 17:45	33	09.04.2002	11:00 – 16:50	5
25.09.2001	08:15 – 12:35	67	10.04.2002	08:20 – 14:20	13
01.10.2001	09:45 – 15:45	21	12.04.2002	09:05 – 09:45	65 ^{*)}
02.10.2001	10:45 – 16:45	62			
08.10.2001	10:45 – 16:45	50			
09.10.2001	08:00 – 14:00	48			
15.10.2001	10:30 – 16:30	15			
16.10.2001	08:00 – 14:00	24			
29.10.2001	10:40 – 16:40	9			
30.10.2001	07:55 – 13:55	8			

^{*)} Räumung der Trocknungshalle 1

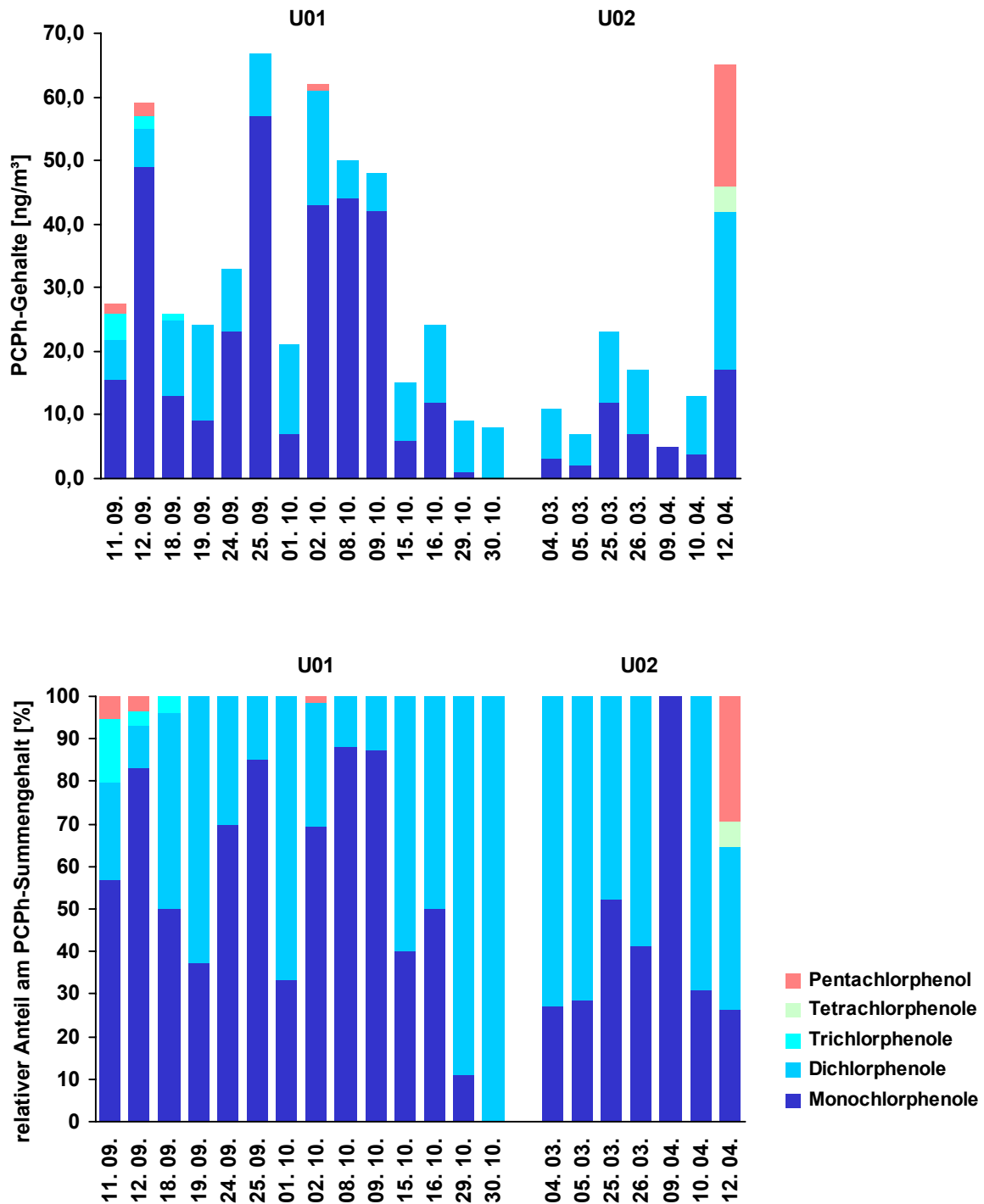


Abb. 21: Darstellung der/s Einzelgehalte/s an Mono-, Di-, Tri-, Tetrachlorphenole und Pentachlorphenol und deren Summengerhalte in der Abluft (ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) sowie der PCPh-Einzelkongenergehalte als relative Anteile an den PCPh-Summengerhalten während der U01 und der U02

Trocknungsvorgangs nicht feststellen. Mit PCPh-Konzentrationen im Bereich von 8 ng/m³ bis 67 ng/m³ (Mittelwert: 34 ng/m³) ergibt sich für die U01 rein rechnerisch ein durchschnittlich um 70 % höherer PCPh-Gehalt als für die U02 mit Konzentrationen im Bereich von 5 ng/m³ bis 65 ng/m³ (Mittelwert: 20 ng/m³).

Am 12.04.2002 wurde mit einem PCPh-Gehalt von 65 ng/m^3 die höchste PCPh-Abluftkonzentration in der U02 ermittelt, die sich signifikant von den PCPh-Abluftkonzentrationen des restlichen Zeitraums der U02 unterscheidet. Eine Erklärung für dieses Phänomen ist – wie bereits im Abschn. 5.2.2.2.2 und 5.2.2.2.3 bei den PCDD/F und PCB detailliert erläutert – in der erhöhten Staubemissionen während der Hallenräumung zu sehen.

In Abb. 21 sind zur Verdeutlichung der Konzentrationsverhältnisse die PCPh-Konzentrationen der Einzelkongenere unterschiedlichen Chlorierungsgrads als relative Anteile an den PCPh-Summengehalten für die U01 und U02 dargestellt.

Wie die Grafik verdeutlicht, sind in den meisten Abluftproben sowohl in der U01 als auch in der U02 die Mono- und Dichlorphenole quantitativ nachweisbar. Dagegen können die Tri-, Tetrachlorphenole und Pentachlorphenol aufgrund der niedrigen Gehalte nur vereinzelt in Abluftproben nachgewiesen werden. In der U01 sind die Monochlorphenole mit Anteilen bis zu 57 %, Dichlorphenole mit bis zu 18 %, Trichlorphenole mit bis zu 4 % und Pentachlorphenol mit bis zu 2 % an den PCPh-Summengehalten beteiligt. Tetrachlorphenole wurden in der U01 in keiner der Proben nachgewiesen.

In der U02 tragen die Monochlorphenole mit bis zu 100 %, Dichlorphenole mit bis zu 73 %, Tetrachlorphenole mit bis zu 6 % und Pentachlorphenol mit bis zu 29 % zu den PCPh-Summengehalten der Abluft bei. In keiner der Abluftproben der U02 konnten Trichlorphenole nachgewiesen werden. Aus der Darstellung der relativen Einzelkongeneranteile geht aus der U01 und U02 kein charakteristisches Verteilungsmuster hervor.

5.2.2.2.6 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Neben den Probenahmen auf polychlorierte organische Stoffe (PCDD/F, PCB, PCBz, PCPh) wurden separat Proben zur Bestimmung der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) durchgeführt. Die untersuchten PAK umfassen 16 Einzelkomponenten entsprechend EPA [9] (vgl. Abschn. 4.1.1).

Die Tab. 21 und Abb. 22 geben die Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in der Abluft als Summenwerte der Einzelkomponentengehalte ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen wieder.

Die PAK-Summengehalten in der Abluft schwanken in der U01 zwischen $0,55 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ und $4,34 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ und in der U02 zwischen $1,08 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ und $7,01 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Mit einem durchschnittlichen PAK-Summengehalt von $1,46 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ liegt in U01 gegenüber der U02 mit durchschnittlich $2,48 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ein um etwa 40 % geringerer Wert vor.

Das in der TA Luft als krebserregender Stoff aufgeführte Benzo(a)pyren unterschreitet mit maximalen Einzelgehalten unter $0,01 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ den als Mindestanforderung vorgegebenen Wert von $0,05 \text{ mg/m}^3$ um mehr als drei Größenordnungen.

In Abb. 22 sind zur Verdeutlichung der Konzentrationsverhältnisse der einzelnen PAK in der Abluft für die U01 und U02 die relativen Anteile der Einzelkomponenten am Summengehalt grafisch dargestellt.

In der Abluft liegt während der U01 die leichtflüchtige Verbindung Naphthalin (NAP) mit relativen Anteilen von 10 % bis 46 % vor. Die etwas schwerer flüchtigen Verbindungen Acenaphthen (ACN) mit 10 % bis 36 %, Fluoren (FLN) 7,4 % bis 35 %, Phenanthren (PHE) 8,0 % bis 30 %, Fluoranthen (FLU) 2,0 % bis 11 % und Pyren (PYR) 1,7 % bis 7,4 % stellen die weiteren Hauptkomponenten am PAK-Summengehalt dar. Des Weiteren tragen die Verbindungen Acenaphthylen (ACE), Anthracen (ANC), Chrysen (CHR) und Dibenz[a,h]anthracen (DBahA) mit relativen Anteilen bis zu 6,6 % zum PAK-Summengehalt bei. Die PAK-Komponenten Benz[a]anthracen (BaA), Benzo[b]fluoranthen

Tab. 21: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Summengehalte für 16 Einzelkomponenten nach [9] ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) in der Abluft während der U01 und der U02

U01			U02		
Datum	Zeitraum	P2 PAK µg/m ³	Datum	Zeitraum	P2 PAK µg/m ³
12.09.01	08:20 – 11:20	2,18	05.03.02	14:00 – 17:00	2,14
13.09.01	08:15 – 11:15	4,34	06.03.02	10:00 – 13:00	1,08
19.09.01	14:30 – 17:30	1,95	27.03.02	09:00 – 12:00	3,04
20.09.01	08:10 – 11:15	0,90	27.03.02	12:15 – 15:05	7,01
26.09.01	08:40 – 11:50	0,91	10.04.02	14:20 – 17:25	0,68
01.10.01	15:50 – 18:30	1,36	11.04.02	11:00 – 14:00	0,91
02.10.01	07:45 – 10:45	1,21			
09.10.01	14:00 – 17:00	0,76			
10.10.01	08:20 – 11:20	1,38			
16.10.01	14:00 – 17:00	0,82			
17.10.01	08:20 – 11:20	1,76			
30.10.01	14:00 – 17:00	0,85			
31.10.01	08:20 – 11:20	0,55			

(BbF), Benzo[k]fluoranthen (BkF), Benzo[a]pyren (BaP), Indeno[1,2,3-cd]pyren (INP) und Benzo[ghi]perylene (BghiP) liegen in der Abluft mit relativen Anteilen unter 0,9 % bzw. unter der Bestimmungsgrenze vor.

In der U02 sind bei den PAK-Summengehalten relative Anteile von 16 % bis 45 % für Naphthalin (NAP), von 4,7 % bis 36 % für Fluoren (FLN), von 20 % bis 45 % für Phenanthren (PHE), von 4,7 % bis 24 % für Fluoranthen (FLU) und von 3,8 % bis 11 % für Pyren (PYR) festzustellen. Insbesondere fällt in der U02 auf, dass die Verbindung Acenaphthen (ACN) in der Abluft nur am 05.03.2002 mit einem relativen Anteil von 18 % und am 11.04.2002 mit einem relativen Anteil von 3,3 % vorzufinden ist; bei den anderen Abluftproben der U02 konnte diese Verbindung nicht nachgewiesen werden. Für die verbleibenden PAK liegen in der U02 die relativen Anteile unter 2,3 % bzw. sind die PAK nicht nachweisbar.

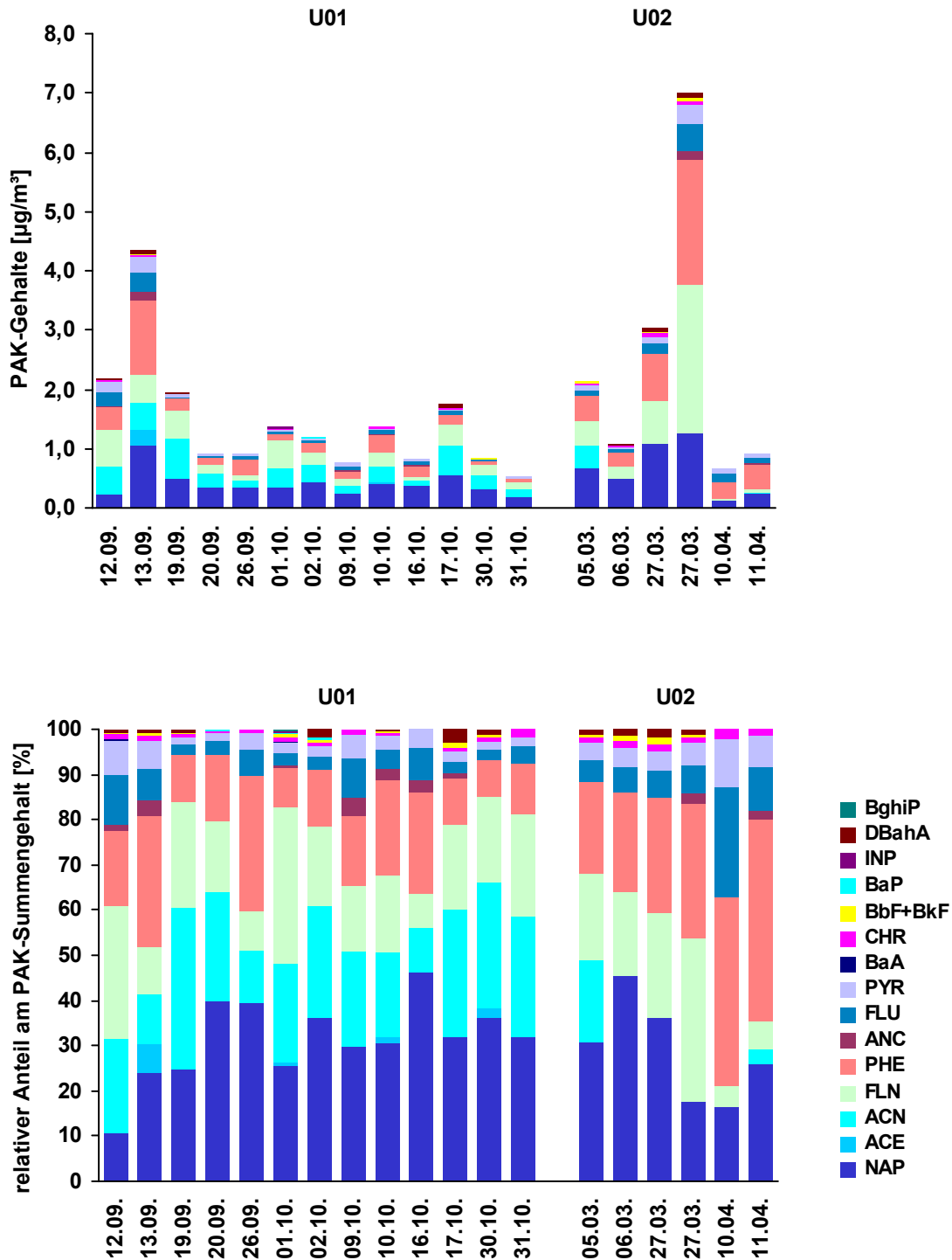


Abb. 22: Darstellung der Einzelgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen und deren Summengehalt (16 Einzelkomponenten nach [9] ohne Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen) sowie der PAK-Einzelkomponentengehalte als relative Anteile an den PAK-Summengehalten in der Abluft während der U01 und der U02

5.2.2.3 Sonstige Parameter

5.2.2.3.1 Geruch

Bei Anlagen, die bei bestimmungsgemäßem Betrieb oder wegen betrieblich bedingter Störanfälligkeit geruchsintensive Stoffe emittieren können, sind Anforderungen zur Emissionsminderung zu treffen, z.B. Einhausen der Anlagen, Kapseln von Anlageteilen, Erzeugen eines Unterdrucks im gekapselten Raum, geeignete Lagerung von Einsatzstoffen, Erzeugnissen und Abfällen, Steuerung, des Regelungsprozesses. Geruchsintensive Abgase sind in der Regel Abgasreinigungseinrichtungen zuzuführen oder es sind gleichwertige Maßnahmen zu treffen [12].

Geruchsintensive Stoffe können im Klärschlamm in erster Linie durch den anaeroben Abbau der organischen Substanz (Kohlenhydrate, Eiweißstoffe etc.) entstehen. Hierbei bilden sich übelriechende Abbauprodukte wie Stickstoffverbindungen (Ammoniak, Amine, Skatol usw.), Schwefelverbindungen (Schwefelwasserstoff, Mercaptane usw.), Kohlenwasserstoffe (Lösungsmittel usw.) und andere Verbindungen mit funktionellen Gruppen (organische Säuren etc.). Da der anaerobe Abbau der organischen Klärschlammsubstanz weitestgehend im Faulturm vorstatten geht, sind von vollständig ausgefaulten Klärschlämmen nur geringe Geruchsemissionen zu erwarten.

An der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang wurde untersucht, ob unerwünschte Geruchsemissionen in der Abluft der Trocknungshalle festzustellen sind. Zur Beurteilung der Geruchsemissionen wurden zu Beginn jeder Untersuchung von Mitarbeitern der Universität Hohenheim Abluftproben aus dem Abluftkanal bei freier und erzwungener Konvektion (stehende bzw. laufende Abluftventilatoren) mittels eines hierfür geeigneten Probenahmesystems (Probenahme in geruchsneutrale Beutel mit einem Unterdrucksystem) entnommen und diese unverzüglich einer Probandenschaft der Universität Stuttgart zur olfaktometrischen Beurteilung zugeleitet. Die Abluftproben wurde dort in einem Olfaktometer mit geruchsneutraler Reinluft unterschiedlich stark verdünnt und auf diese Weise die Geruchsintensität bestimmt. Die hedonische Wirkung (Geruchseindruck) wurde nicht untersucht.

Die Ergebnisse der olfaktometrischen Untersuchungen der Universität Hohenheim sind in den Abb. 23 und 24 zusammengefasst. Zur besseren Einordnung der Lage und Höhe der Geruchsstoffkonzentrationen wurden von der Universität Hohenheim Vergleichsproben am Belebungsbecken und im Rechengebäude (nur U02) der Kläranlage Füssen-Ehrwang entnommen und diese ebenfalls olfaktometrisch untersucht.

Zu Beginn beider Untersuchungen herrschte in der Trocknungshalle der typische Geruch frisch eingebrachten Klärschlamm vor. Die olfaktometrischen Untersuchungen der Trocknerabluft ergaben hierfür bei freier Abluftkonvektion in der U01 und U02 Geruchsstoffkonzentrationen von jeweils 95 GE/m³. Bei erzwungener Konvektion im Abluftventilatorenbetrieb liegen die Geruchsstoffkonzentrationen in der U01 mit 128 GE/m³ und in der U02 mit 101 GE/m³ geringfügig höher.

Eine mögliche Ursache für die Entwicklung der Gerüche in den Klärschlämmen kann in der jeweils 2- bis 4-wöchigen Zwischenlagerung der Klärschlämme in Containermulden bzw. in einer freien Trocknungshalle vor Beginn der U01 und U02 gesehen werden. Im zwischengelagerten Klärschlamm kann es in Abhängigkeit von Temperatur und Lagerdauer in tieferen Schichten zu anaeroben Abbauprozessen (Nachfäulung) unter Bildung geruchsintensiver Stoffe kommen. Die gebildeten Geruchsstoffe werden durch die besonders intensive Belüftung des Klärschlammes mittels der Wendeeinrichtung am Anfang des Trocknungsprozesses jedoch rasch verflüchtigt, so dass nach [2] ab einem Trockenrückstand von etwa 40 % im Halleninneren kein Geruch mehr wahrzunehmen war. Die zu Beginn der Trocknung gemessenen Geruchsstoffkonzentrationen liegen trotz der vorangegangenen Zwischenlagerung der Klärschlämme mit Werten von 101 GE/m³ und 128 GE/m³ auf einem geringen Niveau.

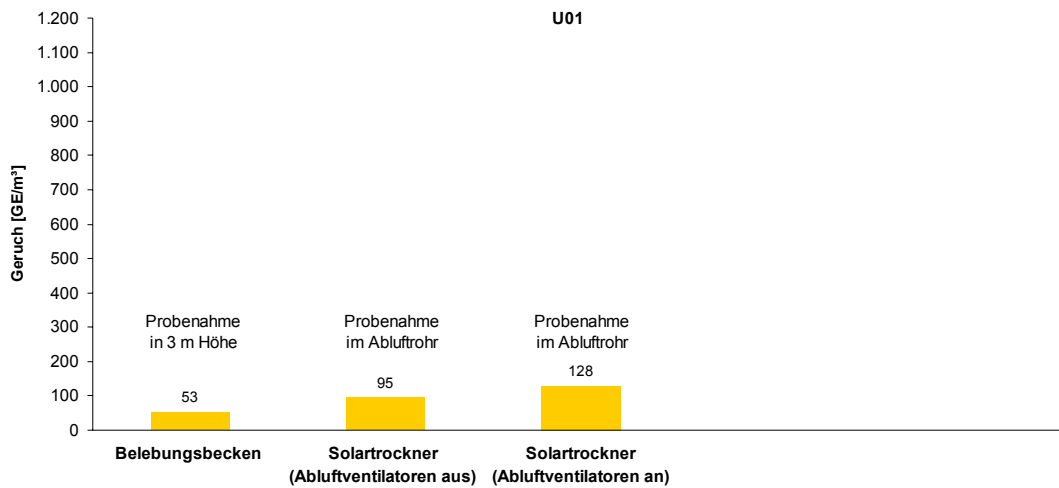


Abb. 23 : Geruchsemissionen in der Abluft der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang am 11.09.2001 (erster Trocknungstag der U01) [16]

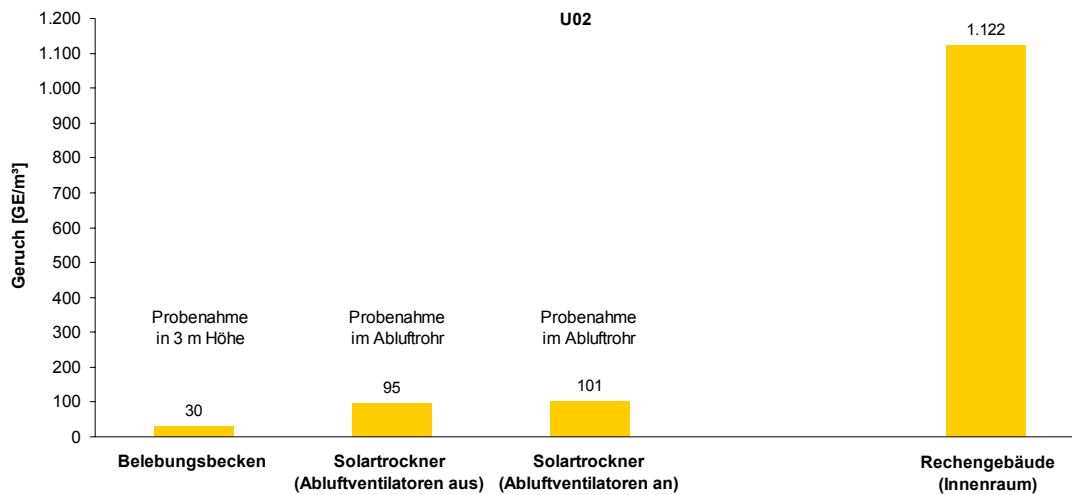


Abb. 24 : Geruchsemissionen in der Abluft im Vergleich am 18.02.2002 (Befülltag der U02) [2,17]

Gemäß den baulichen und betriebliche Anforderungen der TA Luft [12] dürfen die Emissionen an geruchsintensiven Stoffen im Abgas von Klärschlamm-trocknungsanlagen die Geruchsstoffkonzentration von 500 GE/m³ nicht überschreiten. Dieser Wert wird an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang deutlich unterschritten.

5.2.2.3.2 Gesamtstaub

Die Ermittlung der Gesamtstaubgehalte erfolgte simultan zu den Abluftabsaugungen, die zur Bestimmung der gasförmigen bzw. filtergängigen Abluftkomponenten Ammoniak, Chlor-, Fluorwasserstoff, Metalle und Schwefeloxide durchgeführt wurden. Zur Ermittlung der Staubgehalte war es notwendig, den Staub täglich über den gesamten Probenahmezeitraum (insgesamt mehrere Stunden Probenahmezeit) auf einem Planfilter anzureichern und anschließend die abgeschiedene Staubmasse gravimetrisch zu bestimmen.

Ergänzend zu den Probenahmen im mehrwöchigen Verlauf des Trocknungsprozesses wurde bei der U02 am 12.04.02 eine Staubprobenahme im kurzen Zeitraum der Hallenräumung von 09:08 Uhr bis 09:47 Uhr vorgenommen. Die Ergebnisse der Staubgehaltsuntersuchungen in der U02 sind in der Tab. 22 zusammengefasst.

Bei der U01 ergab sich, dass sich die Staubkonzentrationen in der Abluft über den gesamten Trocknungsprozess unterhalb der Nachweisgrenze des eingesetzten Probenahmeverfahrens von $0,1 \text{ mg/m}^3$ befanden. Eine Zunahme der Staubgehalte war mit fortschreitendem Trocknungsprozess nicht feststellbar.

Im Gegensatz zur U01 liegt in der U02 ein Trend zur Zunahme der Staubgehalte in der Abluft mit fortschreitender Trocknungsdauer und fortschreitendem Trocknungsgrad des Klärschlammes vor. Zu Beginn des Trocknungsprozesses befinden sich die Staubgehalte in der U02 - wie bei der U01 - noch unterhalb der Nachweisgrenze des eingesetzten Bestimmungsverfahrens; der Trockenrückstand des Klärschlammes beträgt hier durchschnittlich etwa 30 % – vgl. Abschn. 5.2.1.1. Ab einem durchschnittlichen Trockenrückstand von etwa 50 % (TR im Bereich 37 % bis 75 %) können Staubemissionen durch die Abluft mit $0,1 \text{ mg/m}^3$ probenahmetechnisch erfasst werden. Zum Ende des Trocknungsvorgangs liegen bei durchschnittlichen Trockenrückständen von über 70 % (TR im Bereich 59 % bis 88 %) Staubgehalte in der Abluft im Bereich zwischen $1,1$ bis $3,3 \text{ mg/m}^3$ vor.

Ein direkter Vergleich der im Verlauf des Trocknungsprozesses in der Abluft erfassten Gesamtstaubgehalte mit den in der TA Luft [12] festgelegten Emissionsgrenzwerten ist aufgrund der abweichenden Probenahmedauern sowie der Diskontinuität der durchgeführten Probenahmen nicht möglich. Die im Vergleich zum zulässigen Halbstundenmittelwert um einen Faktor von 3 bis mehr als 100 niedrigeren Gesamtstaubgehalte lassen jedoch im Verlauf des Trocknungsvorgangs keine Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte erwarten.

Tab. 22: Staubgehalte in der Abluft der Trocknungshalle während der U02

U02		P2
Datum	Zeitraum	Gesamtstaub mg/m^3
04.03.2002	10:45 – 17:00	< 0,1
05.03.2002	08:00 – 18:00	< 0,1
06.03.2002	10:00 – 14:00	< 0,1
25.03.2002	11:40 – 17:35	0,1
26.03.2002	10:00 – 18:00	0,1
27.03.2002	09:00 – 15:00	< 0,1
09.04.2002	10:45 – 16:45	3,3
10.04.2002	09:45 – 17:40	2,1
11.04.2002	11:00 – 16:30	1,1
12.04.2002	09:08 – 09:47	48,8 ^{*)}

^{*)} Hallenräumung U02

Für den kurzen Zeitraum der Hallenräumung, die am 12.04.2002 im Zeitraum von 09:08 Uhr bis 09:47 Uhr mit einem Radlader durchgeführt wurde, zeigt sich mit $48,8 \text{ mg/m}^3$ die höchste Staubbelastung in der Abluft. Bedingt durch die poröse und feinkörnige Struktur und die geringe Schüttdichte des getrockneten Klärschlammes werden Feinanteile beim Zusammenschieben und Aufnehmen des Klärschlammes mit der Radladerschaufel oder von den Rädern aufgewirbelt.

Da während des Räumungsvorganges, der sich an den eigentlichen Trocknungsprozess anschließt, die Abluftventilatoren zur Lüftung der Halle manuell auf Maximalleistung betrieben werden, wird der vom Radlader aufgewirbelte Staub unmittelbar in die Umgebung abgeführt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Trocknungsprozess mit einem durchschnittlichen Trockenrückstand von 76,2 % bereits sehr weit fortgeschritten, die Dauer der Hallenräumung mit 39 Minuten relativ kurz und die emittierte Staubfracht mit ca. 1,1 kg relativ gering war. Bezüglich der in der Abluft gemessenen Staubkonzentration ist ferner zu berücksichtigen, dass durch die an die Abluftventilatoren angebaute Messstrecke ein Druckabfall verursacht wurde, der die maximale Förderleistung der Abluftventilatoren von ursprünglich ca. $49.000 \text{ m}^3/\text{h}$ auf ca. $34.500 \text{ m}^3/\text{h}$, also um etwa 30 % reduzierte. Entsprechend kann bei gleicher Staubbildung bei der Hallenräumung im Regelfall von einer geringeren Staubkonzentration in der Abluft ausgegangen werden. Dennoch sollte vom Anlagenbetreiber durch geeignete Maßnahmen und Anweisungen an das Betriebspersonal versucht werden, die Staubemissionen während der Räumung auf das unvermeidliche Mindestmaß zu reduzieren. Als mögliche Maßnahmen in diesem Zusammenhang kommen u.a. in Frage:

- automatische Beendigung des Trocknungsprozesses, wenn der vorgesehene Trockenrückstand von 70 % erreicht ist,
- Anbringung eines zusätzlichen Abluftventilators, um eine schnelle Absaugung des aufgewirbelten Staubes besser zu gewährleisten (nach Angaben des Herstellers inzwischen serienmäßig),
- langsames Einfahren des Radladers und vorsichtiges Schaufeln.

Dem in der Trocknungshalle während der Hallenräumung beschäftigten Betriebspersonal sind angesichts des allgemeinen Staubgrenzwerts für Stäube in der Luft am Arbeitsplatz [18, 19] für alveolengängigen Staub (A-Staub) von 3 mg/m^3 und einatembaren Staub (E-Staub) von 10 mg/m^3 allerdings Arbeitsschutzmaßnahmen zu empfehlen.

5.2.2.3.3 Volumenstrom

Für den Trocknungsprozess ist es erkennbar, dass die Halleninnenluft bei Feuchtigkeitssättigung gegen ungesättigte Umgebungsluft ausgetauscht wird. Zum gezielten Austausch sind in der Hallenrückwand zwei drehzahlgesteuerte Abluftventilatoren eingebaut, die in Verbindung mit einer in der Neigung verstellbaren Zuluftklappe (Hallenvorderseite) den Luftaustausch gewährleisten (vgl. Abschn. 2.2). Die Steuerung der Abluftventilatoren erfolgt – wie der Gesamtbetrieb der Anlage – in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessgrößen (relative Feuchte der Halleninnen-, Umgebungsluft etc.) für jede Trocknungshalle separat. Übergeordnet findet zudem durch die Anlagensteuerung eine Anpassung des Anlagenbetriebs und damit des Abluftventilatorenbetriebs an den Trocknungsfortschritt des Klärschlammes statt (Stufe 1: Belüftungsmodus bis ca. 45 % TR, Stufe 2: Kombimodus von ca. 45 % bis ca. 60 % TR, Stufe 3: Temperaturmodus ab ca. 60 % TR).

Die Prozesssteuerung der Trocknungsanlage ist so eingestellt, dass bei optimalen Witterungsverhältnissen (hohe Sonneneinstrahlung, geringer Feuchtegehalt der Umgebungsluft), die Abluftventilatoren nahezu pausenlos in Betrieb sind. Während der U01 und U02 herrschten jedoch meist wechselnde Witterungsbedingungen vor (bedeckter, bewölkter Himmel, höherer Feuchtegehalt der Umgebungsluft), die einen intermittierenden Betrieb der Abluftventilatoren zur Folge hatten. D.h. die Abluftventilatoren liefen in teils regelmäßigen, teils unregelmäßigen Abständen nur für eine unbestimmte Zeit an. Bei schlechten Witterungsverhältnissen (stark bewölkter Himmel mit Regen-,

Schneefall, feuchtigkeitsgesättigter Umgebungsluft) und in der Nacht blieben die Abluftventilatoren aus oder waren nur sporadisch in Betrieb.

Zur Ermittlung der Abluftvolumenströme in der U01 und U02 war es notwendig, die Strömungsgeschwindigkeiten, Temperaturen, relativen Feuchten der Abluft und die Umgebungsdrücke in einem der beiden Abluftkanäle der Trocknungshalle 1 (Messkanal, vgl. Abb. 5 Abschn. 4.1) in der U01 vom 11.09.2001, 14:45 Uhr, bis 12.11.2001, 11:07 Uhr, und in der U02 vom 18.02.2002, 15:55 Uhr, bis 12.04.2002, 11:35 Uhr, kontinuierlich zu erfassen. Aus den Messdaten, die nahezu lückenlos im gesamten Zeitraum der U01 und U02 erfasst wurden, wurden die feuchten und trockenen Abluftvolumenströme für den Messkanal, bezogen auf den Normzustand, ermittelt.

Da beide Abluftkanäle der Trocknungshalle 1 die gleiche Kanalgeometrie und -länge aufwiesen und die Abluftventilatoren permanent synchron arbeiten, wurden für beide Abluftkanäle gleiche Strömungsverhältnisse und -geschwindigkeiten vorausgesetzt. Zur Ermittlung des Gesamtabluftvolumenstroms der Trocknungshalle 1 wurde deshalb der für den Messkanal ermittelte Abluftvolumenstrom mit dem Faktor 2 multipliziert.

In den Abb. 25 und 26 sind für die U01 bzw. U02 die durchschnittlichen feuchten und trockenen Gesamtabluftvolumenströme der Trocknungshalle 1 an den einzelnen Untersuchungstagen, bezogen auf den Normzustand, angegeben.

Wie aus der Gegenüberstellung der Abbildungen deutlich wird, liegt in der U02 insgesamt eine etwas höhere Schwankungsbreite bei den feuchten und trockenen Abluftvolumenströmen als in der U01 vor. Dies liegt darin begründet, dass die Abluftvolumenströme mit dem Betrieb der Abluftventilatoren direkt korrelieren und der Ventilatorbetrieb von den jahreszeitlichen und täglichen, schwankenden Witterungsverhältnissen beeinflusst wird.

Betrachtet über die gesamte Untersuchungsdauer liegt in der U01 ein durchschnittlicher feuchter Abluftvolumenstrom von 5.040 m³/h und in der U02 von 7.470 m³/h bzw. ein trockener Abluftvolumenstrom von 4.960 m³/h (U01) und 7.360 m³/h (U02) vor. Die feuchten Abluftvolumenströme erreichten max. Werte von ca. 15.500 m³/h (U01) bzw. 19.500 m³/h (U02).

Auf Basis der aus der kontinuierlichen Aufzeichnung berechneten Abluftvolumenströme wurden das aus der Trocknungshalle 1 ausgetragene Gesamtabluftvolumen und die spezifischen, auf die Trockenmasse bzw. die verdunstete Wassermasse bezogenen Gesamtabluftvolumina für die feuchte und trockene Abluft in der U01 und U02 hochgerechnet (vgl. Tab. 23).

Der maximale Abluftvolumenstrom aus der Trocknungshalle wurde für die feuchte Abluft mit 34.420 m³/h und die trockene Abluft mit 33.500 m³/h in der Phase der Hallenräumung (U02 am 12.04.2001 von 09:08 Uhr bis 09:47 Uhr) bestimmt. Hier werden die Abluftventilatoren zur Lüftung der Halle manuell mit maximaler Leistung betrieben.

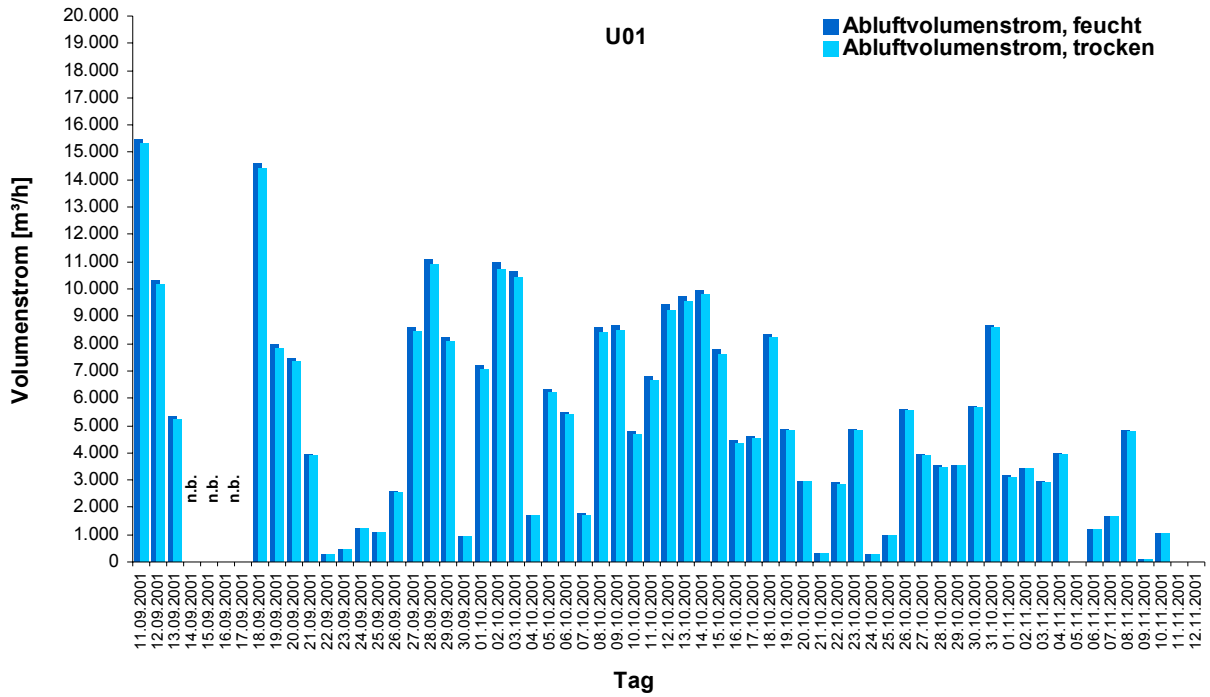


Abb. 25: Feuchte und trockene Abluftvolumenströme an den einzelnen Tagen während der U01 (Tagesmittelwerte, bezogen auf Normzustand); n.b.: nicht bestimmt

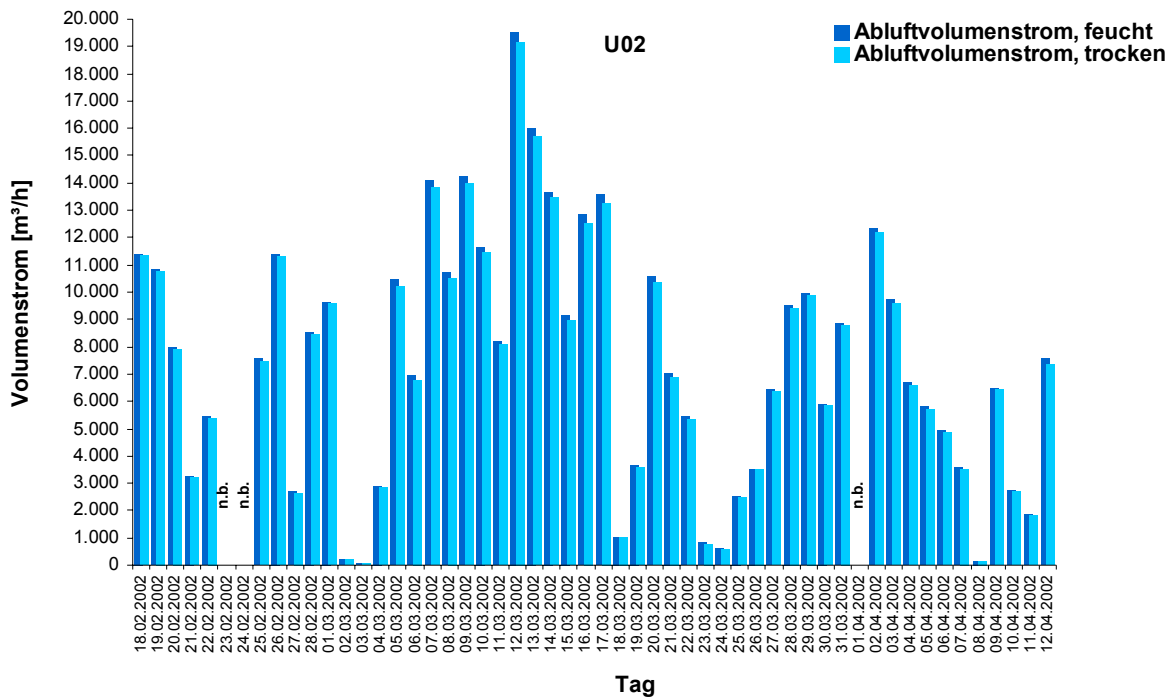


Abb. 26: Feuchte und trockene Abluftvolumenströme während der U02 (Tagesmittelwerte, bezogen auf Normzustand); n.b.: nicht bestimmt

Tab. 23: Feuchte und trockene Abluftvolumenströme sowie Gesamtabluftvolumen (feucht und trocken) während der U01 und U02

Parameter		Einheit	U01	U02
Untersuchung	Beginn	–	11.09.2001	18.02.2002
Untersuchung	Ende	–	12.11.2001	12.04.2002
Untersuchung	Dauer	d	57	53
Abluftvolumenstrom, feucht		m ³ /h	5.040	7.470
Abluftvolumenstrom, trocken		m ³ /h	4.960	7.360
Gesamtabluftvolumen, feucht		m ³	7.400.000	8.110.000
Gesamtabluftvolumen, trocken		m ³	7.120.000	7.910.000
spez. Gesamtabluftvolumen, feucht		m ³ /Mg _{mT}	272.000	507.000
spez. Gesamtabluftvolumen, trocken		m ³ /Mg _{mT}	262.000	495.000
spez. Gesamtabluftvolumen, feucht		m ³ /Mg _{H₂O}	121.000	184.000
spez. Gesamtabluftvolumen, trocken		m ³ /Mg _{H₂O}	117.000	180.000

5.2.3 Lärmemissionen

Im Rahmen der Untersuchungen an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang wurde darauf verzichtet, spezifische Lärmuntersuchungen und Schallfrequenzanalysen durchzuführen. Der Lärmpegel, der vom Betrieb der Trocknungsanlage ausgeht, kann als insgesamt gering bewertet werden, da als potenzielle Lärmquellen nur die Um- und Abluftventilatoren sowie die Wendeeinrichtung zum Tragen kommen. Der Betrieb der Wendeeinrichtung erfolgt aufgrund des elektrischen Antriebs nahezu geräuschlos. Hauptquelle für die verbleibenden Geräusche stellen die Um- und Abluftventilatoren dar, in deren Betriebszeiten zu Beginn ein höherfrequentes surrendes Geräusch und danach ein niederfrequentes dröhnendes Geräusch durch die strömenden Luftmassen in jeweils nur geringer Lautstärke wahrzunehmen sind. Die geringen Geräuschemissionen der Um- und Abluftventilatoren treten dabei gewöhnlich nur tagsüber auf, da diese Aggregate in den Nachtstunden aufgrund des dort im Regelfall mangelnden Trocknungspotenzials außer Betrieb bleiben.

5.2.4 Energiebedarf

Ebenso wie bei konventionellen thermischen Trocknungsverfahren wird bei der solaren Klärschlamm-trocknung auch elektrische und thermische Energie zum Betrieb der Anlage benötigt. So werden an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang elektrische Energie zum Betrieb der Umluft-, Abluftventilatoren, der Wendeeinrichtung, der Anlagensteuerung und thermische Energie für die Verdampfung bzw. Verdunstung des im Klärschlamm enthaltenen Wassers benötigt. Im Unterschied zu konventionellen Klärschlamm-trocknungsverfahren, die die thermische Energie zur Trocknung über die Verbrennung biogener oder fossiler Brennstoffe abdecken, wird die thermische Energie komplett mit Sonnenenergie über die Sonneneinstrahlung sowie über das Trocknungspotenzial der Umgebungsluft abgedeckt. Dies steht, im Gegensatz zu biogenen bzw. fossilen Energieträgern, kostenfrei zur Verfügung, unterliegt aber jahreszeitlichen und täglichen Schwankungen.

Die an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang für die Verdampfung bzw. Verdunstung des Wassers erforderliche thermische Energie ist, wie bei allen Trocknungsverfahren, mit etwa 800 bis 1.000 kWh/Mg_{H₂O} anzusetzen [2, 20, 21]. Diese für alle Trocknungsverfahren einheitliche Kenngröße resultiert daraus, dass der theoretische, als thermischer Energiebedarf für die Verdampfung von Wasser angegebene Verfahrenskennwert von etwa 627 kWh/Mg_{H₂O} [2, 20, 21] in der Praxis aufgrund der zusätzlich für die Erwärmung des Wassers von 20 auf 100 °C sowie des

Feststoffs Klärschlamm und zum Ausgleich von Wärmeverlusten benötigten Wärmeenergie in der Praxis nicht zu erreichen ist.

Wie aus den Auswertungen der kontinuierlichen Aufzeichnungen der Sonneneinstrahlung für die Trocknungshalle 1 [2] folgt, liegt in der U01 ein durchschnittlicher Strahlungswert von $50,12 \text{ W/m}^2$ und in der U02 von $65,13 \text{ W/m}^2$ vor. Die gesamten thermischen Energien aus der Sonneneinstrahlung ergeben sich unter Berücksichtigung der Bodenfläche (500 m^2) in der U01 zu 34.280 kWh und in der U02 zu 41.430 kWh .

Um hieraus handhabbarere Ergebnisse in Bezug auf die Verdunstungsleistung der Anlage zu erhalten und die Vergleichbarkeit mit anderen Trocknungsverfahren zu erleichtern, werden die solaren thermischen Energien auf die in der jeweiligen Untersuchung verdunstete Wassermasse (Mg Wasseraustrag) als allgemeingültige Bezugsgröße normiert. Die daraus abgeleiteten spezifischen thermischen Energien belaufen sich an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang für die U01 auf $562 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$ und für die U02 auf $941 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$.

Neben thermischer Energie wird für den Betrieb der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage elektrische Energie zur Versorgung verschiedener Anlagenkomponenten benötigt. In Tab. 24 sind für die U01 und U02 die in der Trocknungshalle 1 mit Elektrizität versorgten Aggregate mit ihren Gesamtstromverbräuchen im jeweiligen Untersuchungszeitraum [2, 16, 17] angegeben.

Insgesamt wurde zum Betrieb sämtlicher elektrischer Verbraucher in der U01 eine elektrische Energiemenge von 1.424 kWh und in der U02 von 1.342 kWh benötigt. Bei der Betrachtung der Energieverbräuche der Einzelaggregate fällt hier insbesondere auf, dass sich die Verteilungen der Einzelenergieverbräuche auf die Gesamtenergieeinsätze zwischen der U01 und der U02 erheblich unterscheiden. So musste in der U01, bezogen auf den Gesamteinsatz, 50 % der elektrischen Energie für den Betrieb der Umluftventilatoren, 19 % für den Betrieb der Abluftventilatoren und 31 % für den Betrieb der Wendeeinrichtung aufgewendet werden. In der U02 stellt sich hingegen die Verteilung der Einzelenergien mit 59 % für die Umluftventilatoren, 21 % für die Abluftventilatoren und 20 % für die Wendeeinrichtung dar. Dieser signifikante Unterschied kann u.a. auf die Unregelmäßigkeiten im Anlagenbetrieb während der U01 zurückzuführen sein (vgl. Abschn. 3). Des Weiteren beeinflussen witterungsbedingte Faktoren die Energieverteilung auf die Einzelverbraucher.

Zur Beurteilung des elektrischen Energiebedarfs der Anlage wurde der Gesamtenergiebedarf aller elektrischer Verbraucher auf den allgemeinen Bezugswert (Mg Wasseraustrag) normiert. Die Abb. 27 zeigt exemplarisch für die U02 die Verteilung der spezifischen elektrischen Energieverbräuche für einzelne Anlagenkomponenten sowie den daraus resultierenden spezifischen elektrischen Gesamtenergieverbrauch. Der gesamte Bedarf an elektrischer Energie beläuft sich in der U02 auf $30,5 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$, wobei für den Betrieb der vier Umluftventilatoren anteilig am meisten Energie ($17,9 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$) aufgewendet werden musste. In der U01 betrug der elektrische Gesamtenergiebedarf $23,3 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den spezifischen elektrischen Energieverbräuchen anderer, konventioneller thermischer Trocknungsanlagen, die je nach eingesetzter Verfahrenstechnik größer $100 \text{ kWh/Mg}_{\text{H}_2\text{O}}$ und gemäß eigener Untersuchungen zwischen 108

Tab. 24: Energieverbräuche der elektrischen Anlagenkomponenten über den jeweiligen Untersuchungszeitraum der U01 (11.09. bis 31.10.2001) bzw. U02 (18.02.2002 bis 12.04.2002) [2, 16, 17]

elektrischer Verbraucher	Einheit	U01	U02
4 Umluftventilatoren	kWh	717	788
2 Abluftventilatoren	kWh	271	286
1 Wendeeinrichtung	kWh	436	268
Gesamt	kWh	1.424	1.342

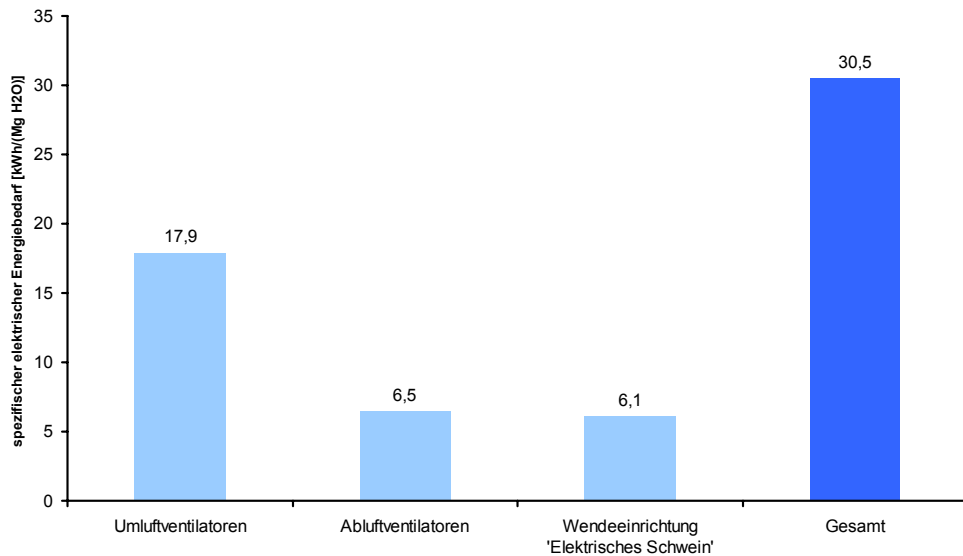


Abb. 27: Spezifischer elektrischer Energieeinsatz der Verbraucher während der U02

und 158 kWh/Mg_{H₂O} [1, 11, 22] betragen, ergibt sich für den Betrieb der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage dank der relativ einfachen Verfahrens- und Anlagentechnik ein sehr geringer elektrischer Energiebedarf.

In Abb. 28 ist zusammenfassend für die U02 die Verteilung der spezifischen thermischen und elektrischen Energie bezogen auf den spezifischen Gesamtenergiebedarf von 972 kWh/Mg_{H₂O} grafisch dargestellt. Die zur Trocknung des Klärschlammes benötigte Gesamtenergie wird zu 97 % mit thermischer Energie der Sonneneinstrahlung und zu 3 % mit elektrischer Energie abgedeckt. In Abb. 29 sind die für verschiedene andere Klärschlamm-trocknungsverfahren aufzuwendenden spezifischen Gesamtenergieverbräuche (elektrisch und thermisch) dem der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage (nur elektrische Energieaufwand) gegenübergestellt.

Anders als bei den konventionellen Klärschlamm-trocknungsanlagen, die den Gesamtenergiebedarf mit thermischer Energie aus der Verbrennung biogener oder fossiler Brennstoffe und elektrischer Energie abdecken, muss an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage nur elektrische Energie zum Betrieb der elektrischen Einrichtungen aufgewendet werden. Gegenüber anderen Klärschlamm-trocknungsverfahren liegt der spezifische Gesamtenergiebedarf der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen daher um mindestens eine Größenordnung niedriger.

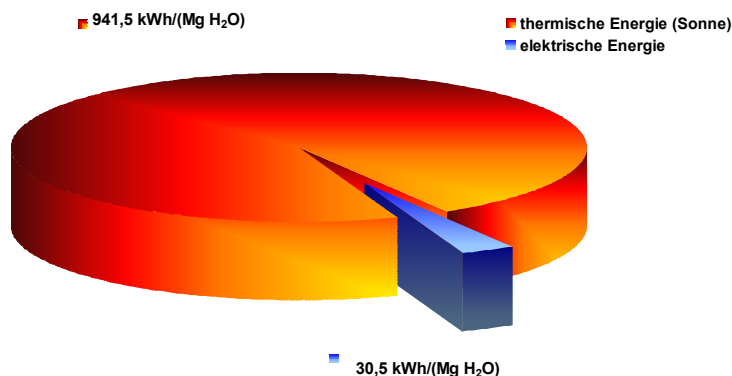


Abb. 28: Spezifischer elektrischer und thermischer Energieeinsatz

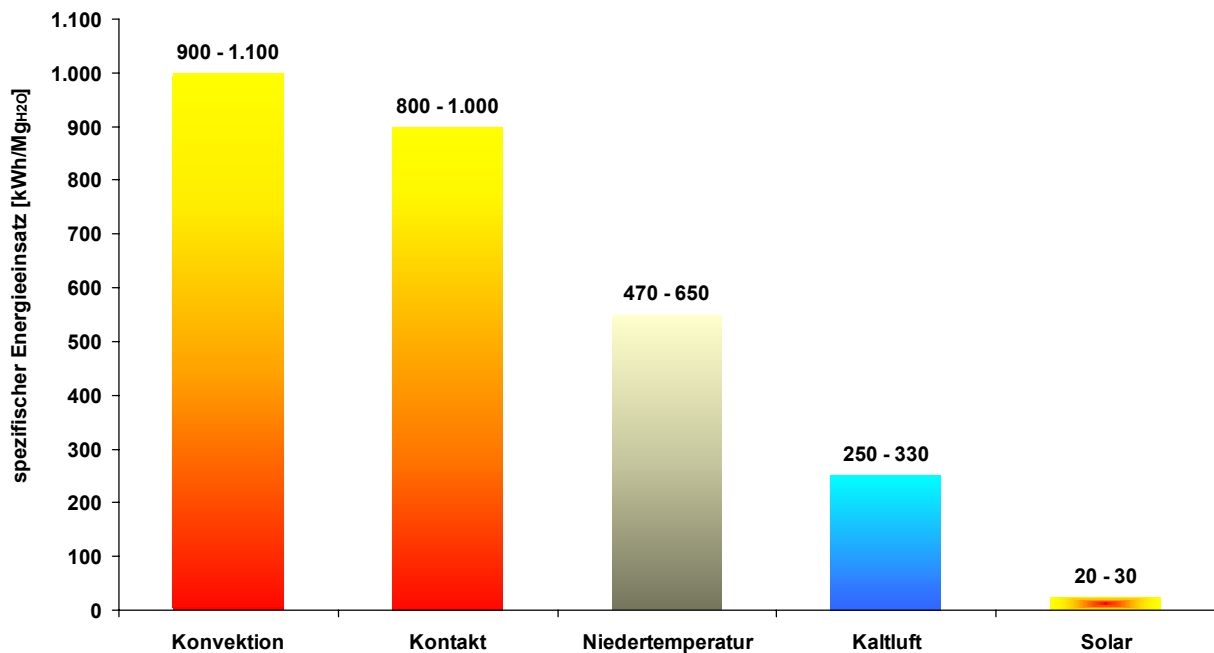


Abb. 29: Vergleich des spezifischen Energiebedarfs verschiedener Trocknungsverfahren [2, 23]

5.2.5 Verdunstungsleistung

Die Verdunstungsleistung stellt eine wichtige Kenngröße für die Auslegung und Dimensionierung der Trocknungsanlage dar und gibt im besonderen Fall der solaren Klärschlamm-trocknung wichtige Hinweise auf die Realisierbarkeit des Verfahrens unter den örtlichen Gegebenheiten (Platzbedarf, klimatische Verhältnisse etc.). Zur Angabe der Verdunstungsleistung wird die im Trocknungszeitraum verdunstete Wassermasse auf die Trocknungsfläche und die Trocknungsdauer bezogen.

Laut Herstellerangaben beträgt die Verdunstungsleistung der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage 0,36 bis 1,2 Mg_{H₂O}/(m²a); dies entspricht einem Wert von 1,0 bis 3,2 kg_{H₂O}/(m²d) [24].

Aus den Untersuchungen ergibt sich für die U01 eine durchschnittliche Verdunstungsleistung von 2,14 kg_{H₂O}/(m²d) und für die U02 von 1,66 kg_{H₂O}/(m²d). In Anbetracht der zu den Untersuchungen vorherrschenden Jahreszeiten (U01 Sommer/Herbst; U02 Winter/Frühjahr) mit den dort vorgelegenen wechselnden klimatischen Verhältnissen (Niederschlags-/Sonnentage) kann dieser Wert als repräsentativer Durchschnittswert für den Standort Füssen-Ehrwang angenommen werden. In der Praxis wird die Verdunstungsleistung im Sommer bei guter Witterung höher und im Winter bei schlechter Witterung geringer sein. Ebenso ist bei höherem Anfangs- und End-Trockenrückstand die durchschnittliche Verdunstungsleistung geringer.

Insgesamt muss für die Trocknung von z.B. auf 40 % Trockenrückstand vorentwässertem Klärschlamm auf einen definierten End-Trockenrückstand weniger Energie als bei einem auf 25 % Trockenrückstand vorentwässerten Klärschlamm aufgewendet werden. Die Verdunstungsleistung ist dagegen bei dem Klärschlamm mit dem höheren Anfangs-Trockenrückstand geringer, da sich der Mechanismus des Wasserentzugs im Verlauf des Trocknungsprozesses verändert. Bei höherem Klärschlamm-trockenrückstand ist wesentlich mehr Energie für den Wasserentzug notwendig. Das bedeutet, dass bei Klärschlamm mit höherem Trockenrückstand höhere Temperaturen erreicht werden müssen, um den schnellen Austritt von Wassermolekülen in die Luft zu ermöglichen.

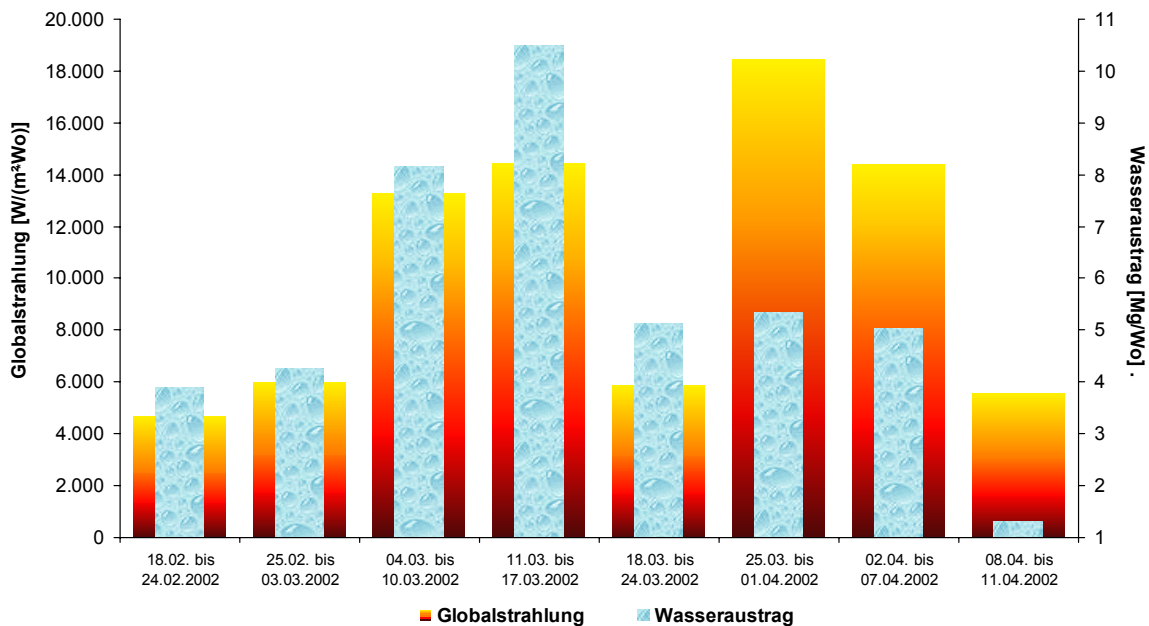


Abb. 30: Wöchentliche Wasserausträge und Globalstrahlungen während der U02

Die Abb. 30 gibt einen summarischen Überblick über dieses Verhalten. Hier sind exemplarisch für die U02 die wöchentlichen Wasserausträge den korrespondierenden Globaleinstrahlungen gegenübergestellt.

Sie zeigt, dass zu Beginn der Untersuchung bei noch hohem Wassergehalt des Klärschlammes der Wasseraustrag mit der Intensität der Sonneneinstrahlung gut korreliert. Mit zunehmendem Trocknungsgrad des Klärschlammes steigt jedoch der solare Energiebedarf für die Entwässerung des Klärschlammes deutlich an. Trotz stärkerer Sonneneinstrahlung wird ab dem 25.03.2002 der Wasseraustrag geringer.

5.2.6 Massen- und Volumenreduktion

Die Verringerung der Schlammmasse und des Schlammvolumens sind die ausschlaggebenden Gründe für eine Trocknung, da sie für den weiteren Entsorgungsweg ökologische und ökonomische Vorteile bedeuten. Der teilweise enorme logistische Aufwand, der für die Entsorgung des Klärschlammes erforderlich ist, kann somit drastisch gesenkt werden. Der notwendige Flächenbedarf kann minimiert und die Entsorgungskosten inklusive der Transportkosten können durch die verringerte Masse herabgesetzt werden.

Die Massenreduktion wurde unter der Annahme einer Ausgangsdichte von 1 kg/dm^3 und der ermittelten Schüttdichte von $0,753 \text{ kg/dm}^3$ am Ende der Trocknung aus den Ergebnissen des Trockenrückstands ermittelt (vgl. Abb. 31). Die Masse des Klärschlammes nahm im Verlauf des 53-tägigen Trocknungsprozesses von 65 Mg auf 21 Mg ab. Dies entspricht einer Massenreduktion bzw. einem Wasseraustrag von 44 Mg.

Das Volumen konnte von 65 m^3 auf ungefähr 28 m^3 reduziert werden. Dies bedeutet eine Verringerung des Transport- und Lagervolumens um 37 m^3 bzw. 57 Vol.-%.

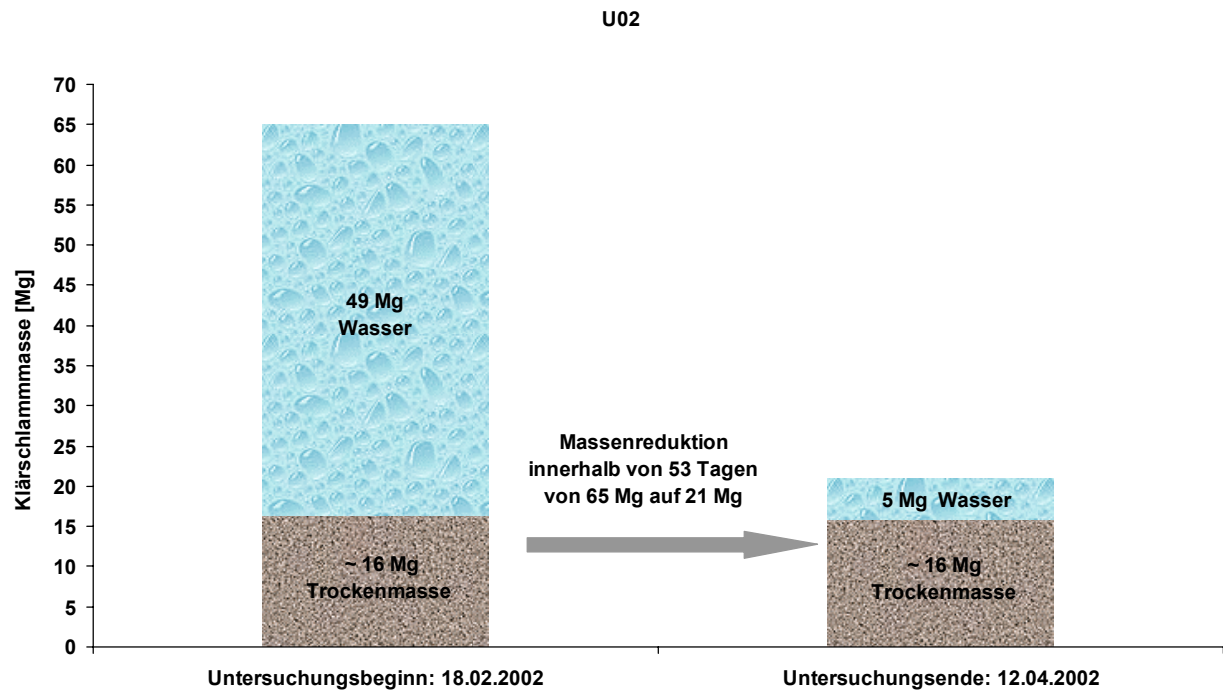


Abb. 31: Massenbilanz der Trocknung vom 18.02.2002 bis zum 12.04.2002 (U02)

5.2.7 Betriebliche Erfahrungen

Die solare Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang stellt laut Betreiber- und Herstellerangaben nur geringe Anforderungen an Wartung, Pflege und Betrieb.

Nach jedem dritten Trocknungsgang bzw. alle drei Monate sind die Lager der Wendeeinrichtung an den Wellenenden mit Lagerfett abzuschmieren und jährlich die Lager, Kette und Lenkzylinder auf korrekte Funktion und Verschleiß zu kontrollieren. Nach Abnutzung der Werkzeuge der Wendeeinrichtung sind diese zu erneuern (je nach Abnutzung frühestens nach 5 Jahren). Zudem sollten die Sensoren für Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Solarstrahlung und Klärschlammtemperatur nach den Herstellerangaben routinemäßig jährlich überprüft werden.

Bei dauerhaft niedrigen Außentemperaturen unter -10 °C ist die Wendeeinrichtung vom Betriebspersonal abzuschalten [25]. Bei neueren Anlagen (ab Baujahr 2001) ist diese Außerbetriebnahme der Wendeeinrichtung bereits automatisiert. In regelmäßigen Abständen sind die Dachrinnen zu reinigen, da sonst die Möglichkeit eines Wassereintritts in die Trocknungshallen und einer Wiederbefeuchtung des Trockenguts besteht. Vor und während jeder Wintersaison ist die Abtaueinrichtung der Dachrinnen entsprechend den Wartungsvorschriften des Herstellers zu überprüfen.

Die Anlage ist für vollautomatischen Betrieb ausgerüstet. Nach Befüllung der Trocknungshalle mit maschinell entwässertem Klärschlamm, dem Herstellen der Stromverbindung und dem Einbringen der Wendeeinrichtung, Einhängen des Begrenzungsbands sowie Schließen der Hallentore sind nach Starten der Automatik im Normalfall keine weiteren Arbeiten bis zum Ende des Trocknungsprozesses mehr erforderlich.

Für das Einbringen des Klärschlammes, die Verteilung und den Anschluss des ‚elektrischen Schweins‘ wird an der Kläranlage Füssen eine Zeit von etwa einer Stunde benötigt. Zusätzlich ist ggf. noch etwa eine Viertelstunde für die Reinigung des Vorplatzes notwendig, wenn der maschinell entwässerte Klärschlamm vor der Trocknung in einer anderen Trocknungshalle zwischengelagert

gert wurde. Durch das Hin- und Herfahren des Radladers wird nämlich der Vorplatz mit an den Reifen anhaftendem Klärschlamm verschmutzt.

Während der Untersuchung kam es – abgesehen von den unvermeidbaren Betriebsunterbrechungen zur Entnahme der Klärschlammproben aus der Trocknungshalle – nur zu wenigen, kurzzeitigen Unterbrechungen infolge von Anlagenstörungen. So war in der U01 eine Unterbrechung des Anlagenbetriebs für den außerplanmäßigen Wechsel der Werkzeuge der Wendeeinrichtung notwendig, da es der Anlagenhersteller versäumt hatte, die Wendewerkzeuge der Wendeeinrichtung bei einer im Vorfeld zur Untersuchung vorgenommene Vergrößerung der Scheibenräder entsprechend anzupassen (vgl. Abschn. 3). Durch bessere Qualitätssicherungsmaßnahmen des Herstellers hätte dies präventiv verhindert werden können. Des Weiteren fuhr sich die elektrische Wendeeinrichtung während der U01 zweimal in einer der Hallenecken fest und musste vom Betriebspersonal per Hand bzw. manuell per Funkfernbedienung aus der Ecke manövriert werden. Im Anschluss an die U01 wurde die Steuerung des ‚elektrischen Schweins‘ optimiert, so dass sich die Wendeeinrichtung in der U02 nicht mehr festfuhr. Im Trocknungsbetrieb ist es ratsam, täglich die elektrische Wendeeinrichtung auf korrekte Arbeitsweise zu kontrollieren, da laut Aussage des Betriebsleiters dieser Fall derzeit noch ein bis zweimal pro Jahr auftritt [26].

Da die Hallentore an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang zu Beginn der Untersuchungen bauseitig komplett mit einer Verkleidung aus Polycarbonat-Doppelstegplatten ausgeführt waren, die keinen klaren und ungetrübten Einblick in die Trocknungshalle gewährten, wurden auf unsere Anregung hin vom Anlagenbetreiber kleine Sichtfenster aus Plexiglas in jedes der Hallentore auf Augenhöhe installiert, die eine einfache Funktionskontrolle der Wendeeinrichtung erlauben. Andernfalls wäre zur Kontrolle der Wendeeinrichtung jedesmal eine Entriegelung und ein Aufschieben der Hallentore notwendig gewesen.

Eine weitere konstruktive Gegebenheit fiel bei den teilweise winterlichen Bedingungen während der U02 auf. Die einzelnen Hallen sind direkt aneinandergelagert. Im Traufbereich zwischen den Hallen sind zum Abfluss von Niederschlags- und Schmelzwasser Regenrinnen angebracht. Bei Schneefall können nur von der äußersten linken und rechten Seitenwand Schneebretter abrutschen, so dass ein Teilbereich des Dachs mit Schnee bedeckt bleibt. Da sich dadurch die in die Trocknungshalle einfallende Sonneneinstrahlung reduziert, verlängert sich der Trocknungsprozess. Außerdem besteht die Gefahr, dass sich feuchte Halleninnenluft an den schneebedeckten und damit kälteren Dachbereichen unter den Taupunkt abkühlt und dort Feuchtigkeit auskondensiert, was zu einer Wiederbefeuchtung des Trockenguts führen kann. Bei Bedarf kann deshalb an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang die Abtaueinrichtung manuell betrieben werden, um so ein Abrutschen des Schnees vom Hallendach und das Abtauen der Schneemassen in den Dachrinnen zu beschleunigen. An Anlagen, bei denen die einzelnen Trocknungshallen komplett voneinander getrennt sind, besteht dieses Problem in geringerem Maße, da der Schnee an beiden Seiten der Trocknungshalle ungehindert vom Dach abrutschen kann. Allerdings bedeutet dies auch einen erhöhten Platz-, Material- und Investitionsbedarf. Zudem wirken sich die erhöhten Wärmeverluste über die zusätzliche freie Hallenseite zur Umgebung hin kontraproduktiv aus.

Die Umluftventilatoren erzeugen einen senkrecht auf das Trockengut gerichteten Luftstrom. Auf der Klärschlammoberfläche unter den Abluftventilatoren (\varnothing ca. 5 m) findet daher eine beschleunigte Trocknung statt – vgl. Abschn. 5.2.1.1. Wären die Deckenventilatoren z.B. auf Laufschienen horizontal beweglich, könnte das Problem der ungleichmäßigen Trocknung vermindert und die Gesamttrocknungszeit verkürzt werden. Außerdem sind die Umluftventilatoren für die Aufwirbelung von Feinkornanteilen verantwortlich. Dies ist insbesondere der Fall, wenn beim Durchgang der Wendeeinrichtung unter den Umluftventilatoren der dort bereits höher getrocknete Klärschlamm aus seinem Gefüge getrennt wird und von den Wendewerkzeugen herabfällt. Bei höheren Trockenrückständen über 50 % sollten die Ventilatoren daher während des Betriebs der Wen-

deinrichtung im Bereich unterhalb der Ventilatoren abgeschaltet oder mit reduzierter Drehzahl betrieben werden.

Aus Gesprächen mit dem Anlagenbetreiber [26] ergaben sich zudem folgende Praxisinformationen. Für den Betrieb einer solaren Klärschlamm-trocknungsanlage ist es von Vorteil, wenn die Trocknungshallen beidseitig über Tore bedienbar sind (standortbedingt war diese Ausführung an der Kläranlage Füssen-Ehrwang nicht möglich). Dies hätte den Vorteil, dass der hintere Bereich der Trocknungshalle für die Zwischenlagerung von maschinell entwässertem oder solar getrocknetem Klärschlamm mitgenutzt und jederzeit per Radlader entnommen werden könnte. Geringere Zwischenlagerungszeiten bedeuten für maschinell entwässerten Klärschlamm dabei immer ein geringeres Potenzial zur Entwicklung von Gerüchen. Zudem kann flexibler auf organisatorische Rahmenbedingungen reagiert werden, wie die Zwischenlagerung von getrocknetem Klärschlamm bis zum Erreichen einer für die Beladung eines kompletten Lkw genügenden Menge. Insbesondere sind im Vorfeld der Konzeption und des Baus einer solaren Klärschlamm-trocknungsanlage die individuellen Anforderungen an den späteren Anlagenbetrieb, wie z.B. die erforderliche lichte Hallentor- und Innenraumhöhe, zu berücksichtigen, um - wie im vorliegenden Fall der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang - ein einfaches und sicheres Einbringen des maschinell entwässerten Klärschlammes durch Abkippen von Containermulden mit einem Lkw in der Halle zu ermöglichen. Praxisprobleme ergeben sich weiter bei einer zu hohen Trocknung von Klärschlämmen (über 70 % TR), die aufgrund ihrer lockeren und feinkörnigen Struktur zu starker Staubentwicklung neigen und bei der Entleerung der Trocknungshalle, beim Verladen und Weitertransport schwerer zu handhaben sind.

6 Zusammenfassung und Bewertung

Die Bayerischen Landesämter für Umweltschutz und für Wasserwirtschaft führten vom 11.09. bis 06.11.2001 (U01) und 18.02. bis 12.04.2002 (U02) Untersuchungen auf dem Klärwerk des Abwasserzweckverbands Füssen in Ehrwang an der Hochleistungszentrifuge und dem solaren Klärschlamm-trockner der Fa. Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH, Alfdorf-Pfahlbronn, durch. Ziel war es, weiterführende Erkenntnisse über das Verhalten der im Klärschlamm enthaltenen Stoffe im Verlauf des Trocknungsprozesses, die Abluftemissionen, den Energiebedarf, die Verdunstungsleistung und den Praxisbetrieb der Trocknungsanlage zu erhalten.

Der anaerob stabilisierte Klärschlamm wird durch die Hochleistungszentrifuge von durchschnittlich 2,8 % auf 27,8 % Trockenrückstand in der U01 und auf 25,1 % Trockenrückstand in der U02 entwässert. In Anbetracht der zur Verfügung stehenden Hochleistungszentrifuge ist der Entwässerungsgrad nicht sehr hoch. Für den anschließenden solaren Trocknungsprozess ist ein höherer maschineller Entwässerungsgrad jedoch im Hinblick auf den Gesamteinsatz an elektrischer Energie und die Betriebs-, Lebensdauer und den Betriebsmitteleinsatz der Zentrifuge nicht unbedingt von Vorteil. Ist nämlich eine ausreichende Behandlungskapazität gegeben, so muss für den Wasserentzug im solaren Trocknungsprozess gegenüber der maschinellen Entwässerung weniger elektrische Energie aufgewendet werden. Durch die Beschränkung der maschinellen Entwässerung auf das notwendige Mindestmaß kann somit elektrische Energie für den Gesamtentwässerungsprozess eingespart werden. Andererseits kann bei Bedarf mit einer besseren Ausnutzung der Zentrifugenleistung hin zu höheren Entwässerungsgraden aufgrund des höheren Eingangs-Trockenrückstands der Trocknungszeitraum, z.B. im Winter, um einige Tage verkürzt oder der erforderliche Flächenbedarf für die Trocknungsanlage minimiert werden.

Solare Trocknung

Für die Trocknung des Klärschlammes auf einen Trockenrückstand von 47,7 % wurden in der U01 57 Tage und auf einen Trockenrückstand von 76,2 % in der U02 53 Tage benötigt. Bedingt durch Unregelmäßigkeiten im Anlagenbetrieb in der U01 (zu kurze Mischwerkzeuge der Wendeeinrichtung) wurde die Trocknung dort bei dem geringeren TR abgebrochen. Für die Belastung der Klärschlämme mit den in der AbfKlärV [8] angegebenen Stoffen Blei, Chrom, Kupfer, Zink, Cadmium, Nickel, Quecksilber, AOX-Verbindungen, polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) und den ergänzend zur AbfKlärV untersuchten Stoffen polychlorierte Benzole (PCBz), polychlorierte Phenole (PCPh) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) ergeben sich geringe Gehalte. Sämtliche Grenzwerte der AbfKlärV [8] werden für diese Stoffe weit unterschritten. So liegen die Metall-Konzentrationen – mit Ausnahme für Kupfer und Zink – alle unter dem bayerischen Durchschnitt [7]. Die Metall-, AOX- und PCB-Gehalte bleiben im Verlauf des solaren Trocknungsprozesses im Klärschlamm annähernd konstant. Diese Stoffe bleiben folglich im solaren Behandlungsprozess im Klärschlamm gebunden. Über den Verlauf der Trocknung ist für PCDD/F eine Abnahme um 14 % (U02), PCPh um 22 % (U01), PAK um 32 % (U01) bzw. 47 % (U02) im behandelten Klärschlamm festzustellen.

Abluftemissionen

Die Abluftemissionen der solaren Trocknungsanlage bezüglich der anorganischen Stoffe Kohlenstoffmonoxid, gasförmige anorganische Chlor- und Fluorverbindungen, Schwefeloxide, Stickstoffoxide, Ammoniak, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Selen, Tellur, Thallium, Vanadium, Zinn, Zink und ihren Verbindungen sind allesamt als sehr gering zu bewerten. Die Abluftgehalte an Kohlenstoffmonoxid, anorganischen Chlor- und Fluorverbindungen sowie Schwefeloxiden befinden sich jeweils unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens. Für Quecksilber und Thallium liegen die Gehalte um mehr als drei Größenordnungen und für Blei, Kobalt, Nickel, Selen und Tellur um mehr als zwei Größenord-

nungen unter den in der TA Luft [12] als staubförmige anorganische Stoffe der Klasse I bzw. II angegebenen Grenzwerten. Ebenso werden die Grenzwerte der TA Luft [12] für Antimon, Chrom, Kupfer, Mangan, Vanadium und Zinn als staubförmige anorganische Stoffe der Klasse III und für Arsen und Cadmium als krebserregende Stoffe deutlich unterschritten. Im Verlauf der Trocknung ist für Ammoniak in der U01 eine kontinuierliche Abnahme in der Abluft und in der U02 zunächst eine Abnahme, verbunden mit einem späteren leichten Wiederanstieg festzustellen. Insgesamt bleiben die Ammoniak-Gehalte aber mit einer maximalen Konzentration von $8,4 \text{ mg/m}^3$ zu Beginn der U01 unter der für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Klärschlammrocknungsanlagen gemäß der TA Luft [12] relevanten Beschränkung von 20 mg/m^3 .

Die Abluftemissionen an organischen Stoffen (PCDD/F, PCB, PCBz, PCPh und PAK) sind – ebenso wie die Emissionen der anorganischen Stoffe – als gering einzustufen. Der in der TA Luft [12] für organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff, vorgegebene Grenzwert von 20 mg/m^3 wird in beiden Untersuchungen mit Maximalkonzentrationen für Halbstundenmittelwerte von $16,0 \text{ mg/m}^3$ bzw. $7,0 \text{ mg/m}^3$ deutlich unterschritten. Die Gehalte an PCDD/F befinden sich in der Abluft unter $1,7 \text{ pg I-TE/m}^3$ und liegen damit um zwei Größenordnungen unter dem in der TA Luft [12] angegebenen Grenzwert von $0,1 \text{ ng I-TE/m}^3$. Gleichfalls bleiben die Abluftemissionen an PCB, PCBz, PCPh und PAK im Verlauf der Trocknung auf einem niedrigen Konzentrationsniveau.

Mit Geruchsstoffkonzentrationen von 128 GE/m^3 zu Beginn der U01 und von 101 GE/m^3 zu Beginn der U02 werden an der solaren Klärschlammrocknungsanlage Füssen-Ehrwang nur geringe Mengen geruchsintensiver Stoffe emittiert. Geruchsbelästigungen der Umgebung können daher beim bestimmungs- und ordnungsgemäßen Betrieb der solaren Klärschlammrocknungsanlage weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Staubemissionen sind in der U01 permanent unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Analyseverfahrens von $0,1 \text{ mg/m}^3$. In der U02 liegt dagegen eine Korrelation zum Trockenrückstand im Klärschlamm vor. Mit fortschreitender Trocknungsdauer und dem damit verbundenen höheren Trockenrückstand steigen die Staubemissionen von kleiner $0,1 \text{ mg/m}^3$ bis zu $3,3 \text{ mg/m}^3$ während des Anlagenbetriebs an (Grenzwert der TA Luft [12] für Gesamtstaub: 10 mg/m^3).

Im kurzen Zeitraum der Hallenräumung, die an der solaren Klärschlammrocknungsanlage Füssen-Ehrwang mit einem Radlader durchgeführt wurde, traten mit $48,8 \text{ mg/m}^3$ die höchsten Staubemissionen in der Abluft auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Trocknung des Klärschlammes mit durchschnittlich $76,2 \%$ Trockenrückstand bereits sehr weit fortgeschritten (Beendigung der Trocknung normalerweise bei 70% TR) und die Emissionsdauer mit 39 Minuten für die Zeitdauer der Hallenräumung sehr kurz war. Durch geeignete betriebliche Maßnahmen, z.B. Betriebsanweisungen an das Räumungspersonal im Hinblick auf eine staubminimierte Arbeitsweise bei der Hallenräumung, sollte hier besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, die Staubemissionen und die Exposition des Personals auf das erforderliche Mindestmaß zu beschränken. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, den Trockenrückstand des Klärschlammes im Endstadium des Trocknungsprozesses, z.B. ab 60% Trockenrückstand, intensiver zu kontrollieren, um den Trocknungsprozess bei Erreichen des End-Trockenrückstands von 70% sofort abbrechen zu können. Werden hingegen an der solaren Klärschlammrocknungsanlage Füssen-Ehrwang für die Klärschlämme dauerhaft End-Trockenrückstände über 70% angestrebt, so sind geeignete Maßnahmen zur Verminderung der Staubemissionen bei der Hallenräumung und beim anschließenden Handling der trockenen Klärschlämme zu treffen.

Energiebedarf

Anders als bei den konventionellen Klärschlamm-trocknungsanlagen, die den Gesamtenergiebedarf mit thermischer Energie aus der Verbrennung biogener oder fossiler Brennstoffe und elektrischer Energie abdecken, wird an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen nur elektrische Energie zum Betrieb der elektrischen Einrichtungen benötigt. Der gesamte elektrische Energiebedarf betrug in der U01 1.424 kWh und in der U02 1.342 kWh. Der spezifische elektrische Energiebedarf beläuft sich damit in der U01 auf 23,3 kWh und in der U02 auf 30,5 kWh pro Mg verdampftem Wasser. Dieser spezifische Energieeinsatz ist ausgesprochen gering. Gegenüber anderen Klärschlamm-trocknungsverfahren liegt der spezifische Gesamtenergiebedarf der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen um mindestens eine Größenordnung niedriger. Im Vergleich hierzu benötigen konventionelle Trocknungsanlagen mehr als das 3-fache an elektrischer Energie. Zusätzlich müssen an diesen Anlagen fossile oder biogene Brennstoffe als Energieträger für den thermischen Trocknungsprozess aufgewendet werden.

Praxisbetrieb

Während der Untersuchungen waren im mehrwöchigen Trocknerbetrieb nur geringfügige Betriebsstörungen zu verzeichnen. Abgesehen von einem zu Beginn der U01 irregulären Anlagenbetrieb, der auf ein Verschulden des Anlagenherstellers (Nichtanpassung der Werkzeuge der verwendeten Wendeeinrichtung bei einer vorangegangenen Vergrößerung der Scheibenräder) zurückzuführen war, beschränkten sich die Störungen im weiteren Untersuchungsverlauf auf ein zweimaliges manuelles Verschieben der Wendeeinrichtung nach dem Festfahren in einer Hallenecke in der U01 und einen zweimaligen Neustart der Anlage nach Sicherheitsabschaltung in der U02 (Ansprechen der Lichtschranke durch Vogelflug in der Halle). Nach Optimierung der Steuerung blieb in der U02 das Festfahren der Wendeeinrichtung aus.

Die in der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage Füssen-Ehrwang erzielbare Trocknungsleistung hängt generell stark von den Witterungsbedingungen ab. Auch falsches Betriebsmanagement (verspätetes Entleeren der Anlage, obwohl TR bereits erreicht oder überschritten ist; zu lange Befülldauer nach der Entleerung, falsche Einstellung der Regelung/Steuerung) kann zur Verminderung der jährlichen Trocknungsleistung führen.

Bei der Entleerung der Trocknungshalle mit einem Radlader war in der Trocknungshalle bei einem Trockenrückstand von 76,1 % eine arbeitsschutzrelevante Staubentwicklung festzustellen.

Resümee

Für die Untersuchungen an der solaren Klärschlamm-trocknungsanlage des AZV Füssen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass im gemäßigten Klimazonenbereich von Bayern die solare Trocknung von kommunalen Klärschlämmen technisch, ökologisch und ökonomisch [2] möglich ist. Das Verfahren stellt aufgrund des innovativen Charakters, des geringen apparativen Aufwands, der niedrigen Emissionen und des geringen spezifischen Energieverbrauchs eine Alternative zu den bewährten konventionellen Trocknungsverfahren dar. Das Verfahren ist damit insbesondere als dezentrale Lösung für Kläranlagen, die über ausreichend Flächenressourcen für die Aufstellung der Hallenkonstruktion verfügen, und für zu erreichende Trockenrückstände unter 60 % bis 70 % bei mechanisch vorentwässerten Klärschlämmen gut geeignet. Im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren kann aufgrund des chargenweisen Betriebsablaufs und des mehrwöchigen Trocknungsprozesses bei der solaren Klärschlamm-trocknung an der Kläranlage ggf. ein Zwischenlager für den maschinell entwässerten oder getrockneten Klärschlamm als ergänzende Infrastruktureinrichtung notwendig werden. Die Gesamtdauer des Trocknungsprozesses hängt bei der solaren Klärschlamm-trocknung wesentlich von den jahreszeitlich und den lokal gegebenen Witterungsverhältnissen ab und unterliegt dadurch bedingt gewissen Schwankungen.

In Bezug auf die Effizienz des gesamten Klärschlammbehandlungsverfahrens vom Nassschlamm hin zum getrockneten Endprodukt ist eine optimale Abstimmung der einzelnen Behandlungsstufen ein entscheidendes Kriterium. Bei der Gesamtkonzeption ist der beabsichtigte weitere Entsorgungsweg mit den individuellen Anforderungen an die Eigenschaften der getrockneten Klärschlämme (z.B. Trocknungsgrad, Korngrößenverteilung) mit einzubeziehen.

7 Danksagung

Der vorliegende gemeinsame Bericht der Bayerischen Landesämter für Umweltschutz (LfU) und für Wasserwirtschaft (LfW), zwei Behörden im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, entstand im Zeitraum von Mai 2002 bis Mai 2003 am Josef-Vogl-Technikum des LfU.

Im Rahmen der Untersuchung wurde von Herrn Dipl.-Ing. (FH) Korbinian Atzenbeck am LfW eine Diplomarbeit mit dem Thema „Solare Klärschlamm-trocknung – Eine wissenschaftliche Untersuchung an der Kläranlage Füssen“ im Fachbereich Bauingenieurwesen, Siedlungswasserwirtschaft, der Fachhochschule München angefertigt. Ihm gilt unser besonderer Dank für seinen Einsatz vor Ort und die Auswertung der Ergebnisse, die wesentlich zum Gelingen der Untersuchung beigetragen und in den vorliegenden Bericht Eingang gefunden haben.

An der Durchführung der Untersuchung vor Ort und der Auswertung der Untersuchungsergebnisse war daneben das Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim, Stuttgart, fachlich beteiligt. An dieser Stelle bedanken wir uns bei Herrn Dr. Markus Bux und Herrn Dipl.-Ing. sc. agr. Rainer Baumann für ihre praktische und fachliche Unterstützung bei den olfaktorischen Messungen, der Erfassung und Auswertung der Betriebs- und Klimadaten und der Diskussion der Ergebnisse.

Insbesondere gilt unser Dank Herrn Franz Petz, dem Leiter der Kläranlage Füssen-Ehrwang und jetzigen Betriebsleiter des Abwasserzweckverbands Füssen, sowie Herrn Josef Jäger, dem damaligen Betriebsleiter, für ihre Kooperationsbereitschaft und freundliche Unterstützung.

8 Literatur

- [1] Hruschka, H.; Siewert, H.; Bogner, T.; Heider, J.; Schindler, M.:
Gemeinsamer Bericht der Bayer. Landesämter für Wasserwirtschaft und für Umweltschutz über die Untersuchung der Klärschlamm-trocknungsanlage auf dem Klärwerk der Stadt Sulzbach-Rosenberg in der 42. KW 1997 (13.10. – 17.10.1997).
Bayerische Landesämter für Wasserwirtschaft und für Umweltschutz, München 1998
- [2] Atzenbeck, K.:
Solare Klärschlamm-trocknung – Eine wissenschaftliche Untersuchung an der Kläranlage Füssen.
Diplomarbeit aus dem Fachbereich 02, Bauingenieurwesen, der FH München, 2002
- [3] Anonym:
Informationsmaterial des AZV Füssen.
- [4] Bux, M.:
Solare Klärschlamm-trocknung eine ernstzunehmende Option?
Die Gemeinde (2002) 4, S. 125
- [5] Stephan, K.; Mayinger, F.:
Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen. Band 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktion.
Springer Verlag, Berlin 1992, S. 289
- [6] Anonym (KrW-/AbfG):
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27.09.1994.
Bundesgesetzblatt (1994) Teil I, S. 2705, zuletzt geändert 2002, S. 3322
- [7] Anonym:
Klärschlammbericht des Freistaats Bayern 2001.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2002
- [8] Anonym (AbfKlärV):
Klärschlammverordnung vom 15.04.1992.
Bundesgesetzblatt (1992) Teil I, S. 912; zuletzt geändert 2002, S. 1488
- [9] Environmental Protection Agency:
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Method 610.
Federal Register 44 (1979) 233, S. 69514 – 69517
- [10] Marb, C.; Riedel, H.; Schindler, M.:
Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben: Vergleichende Untersuchungen von Verfahren zur thermischen Klärschlamm-trocknung und -entsorgung.
Bayerische Landesamt für Umweltschutz, München 1995
- [11] Hruschka, H.; Siewert, H.; Schindler, M.; Beck, W.; Riedel, H.:
Gemeinsamer Bericht der Bayer. Landesämter für Wasserwirtschaft und für Umweltschutz über die Untersuchung der Klärschlamm-trocknungsanlage auf der Kläranlage des AV Obere Leiblach in Hergatz.
Bayerische Landesämter für Wasserwirtschaft und für Umweltschutz, München und Augsburg 1997
- [12] Anonym (TA Luft):
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. TA Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24.07.2002.
Gemeinsames Ministerialblatt (2002) 25 – 29, S. 511

- [13] Anonym (17. BImSchV):
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe – 17. BImSchV) vom 23.11.1990.
Bundesgesetzblatt (1990) Teil I, S. 2545, ber. S. 2832, zuletzt geändert 2000, S. 632
- [14] Holleman, A.:
Lehrbuch der anorganischen Chemie. Holleman-Wiberg.
De Gruyter, Berlin, New York 1985, S 12
- [15] Ballschmiter, K.; Schäfer, W.; Buchert, H.:
Isomer-specific identification of PCB congeners in technical mixtures and environmental samples by HRGC-ECD and HRGC-MSD.
Fresenius Z. Anal. Chem. (1987) 326, S. 253 – 257
- [16] Bux, M.; Baumann, R.:
Wissenschaftliche Begleitung der solaren Klärschlamm-trocknung auf der KA Füssen. Kurzfassung Ergebnisse.
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen, Stuttgart 2001
- [17] Bux, M.; Baumann, R.:
Wissenschaftliche Begleitung der solaren Klärschlamm-trocknung auf der KA Füssen. Kurzfassung Ergebnisse.
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen, Stuttgart 2002
- [18] Anonym (Technische Regeln für Gefahrstoffe):
Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz – Luftgrenzwerte (TRGS 900).
BArbBl. Nr. 9 (2001), S. 86 – 89
- [19] Anonym (Technische Regeln für Gefahrstoffe):
Begründungen und Erläuterungen zu den Grenzwerten in der Luft am Arbeitsplatz (TRGS 901) – Nr. 96 „Allgemeiner Staubgrenzwert“.
BArbBl. Nr. 9 (2001), S. 89 – 96
- [20] Otte-Witte, R.:
Verfahrensvergleich Klärschlamm-trocknung.
ATV-Seminar (1996) Konditionierung, Entwässerung und Trocknung von Klärschlamm, S. 16
- [21] Anonym:
Trocknung kommunaler Klärschlämme in Deutschland – Teil 2: Erfahrungen mit bestehenden Anlagen. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 3.3.1 „Klärschlamm-Trocknungsanlagen“ im ATV-Fachausschuss 3.3 „Energetische Verwertung und thermische Behandlung“.
Korrespondenz Abwasser 46 (1999) 9, S. 1445 – 1456
- [22] Hruschka, H.; Siewert, H.:
Bericht des Bayer. Landesamtes für Wasserwirtschaft über die Untersuchung der Klärschlamm-trocknungsanlage des Klärwerkes Markt Bruckmühl.
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München 1996
- [23] Anonym:
Prospekt, Informationsmaterial, Herstellerangaben.
ist-Anlagenbau GmbH 2002
- [24] Anonym:
Herstellerinformationen.
Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH, Alfdorf-Pfahlbronn

- [25] Anonym:
Bedienungsanleitung solare Klärschlamm-Trocknungsanlage. Benutzer Ebene. Stand 01.10.2001.
Thermo-System Industrie- & Trocknungstechnik GmbH, Alfdorf-Pfahlbronn 2001
- [26] Petz, Franz:
Persönliche Mitteilung vom 12.04.2002 und 29.04.2003.

9 Anhang

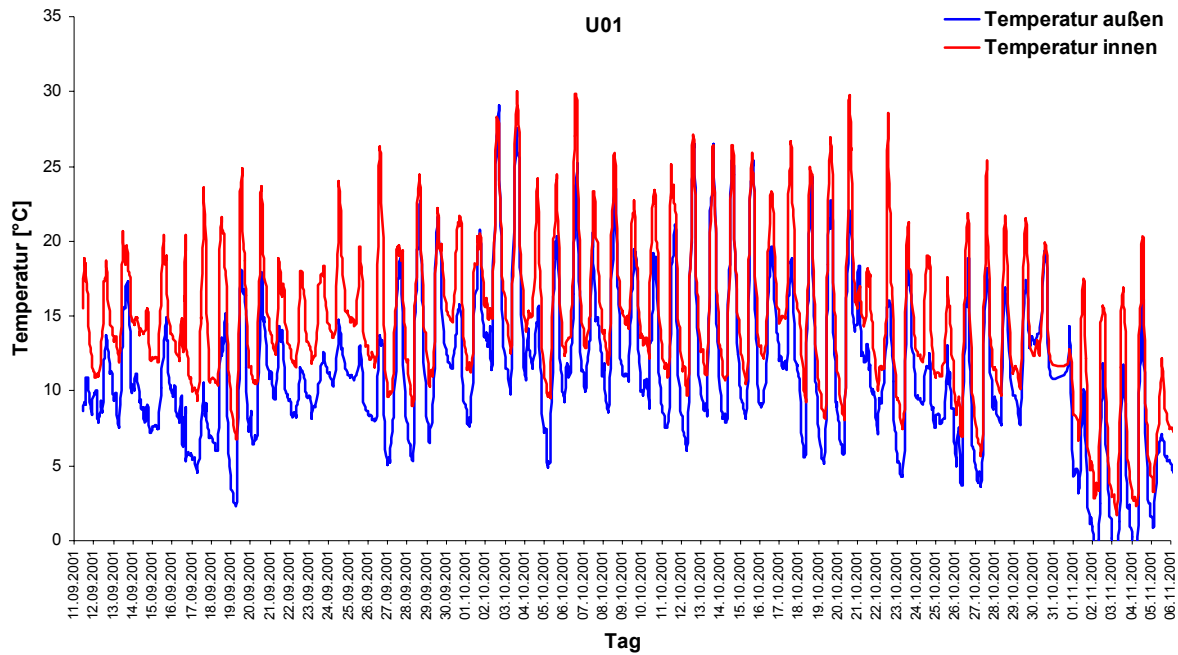


Abb. 32: Verlauf der Temperatur in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U01 (11.09. bis 06.11.2001)

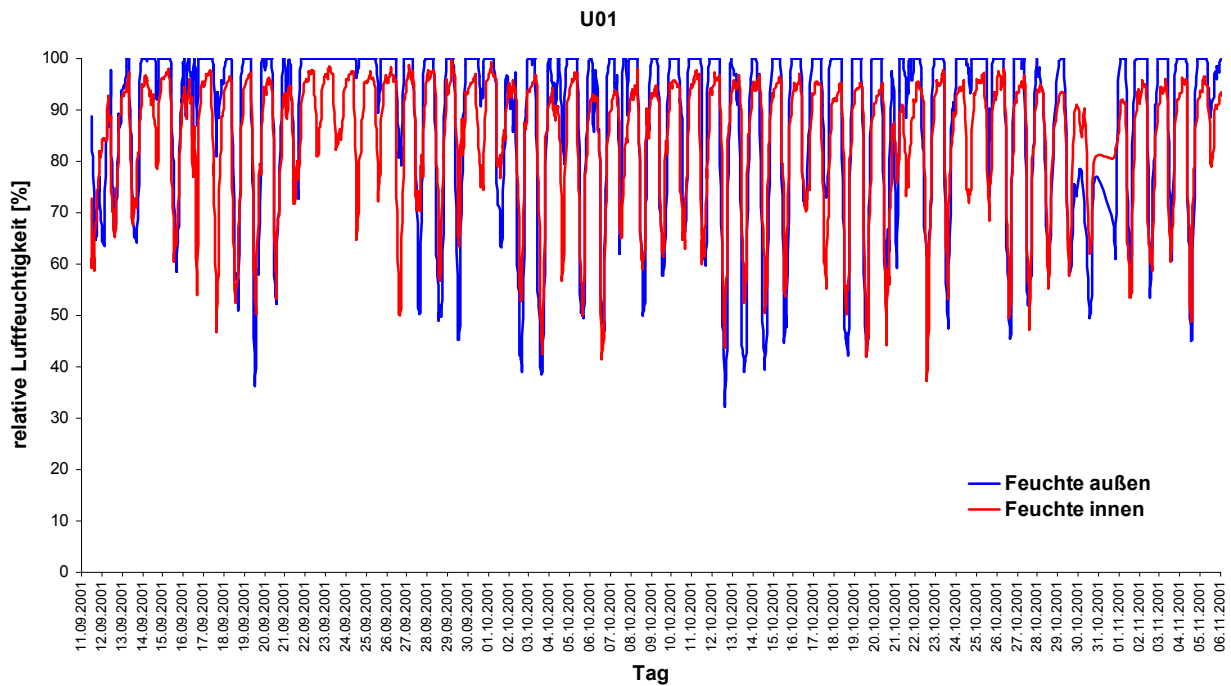


Abb. 33: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U01 (11.09. bis 06.11.2001)

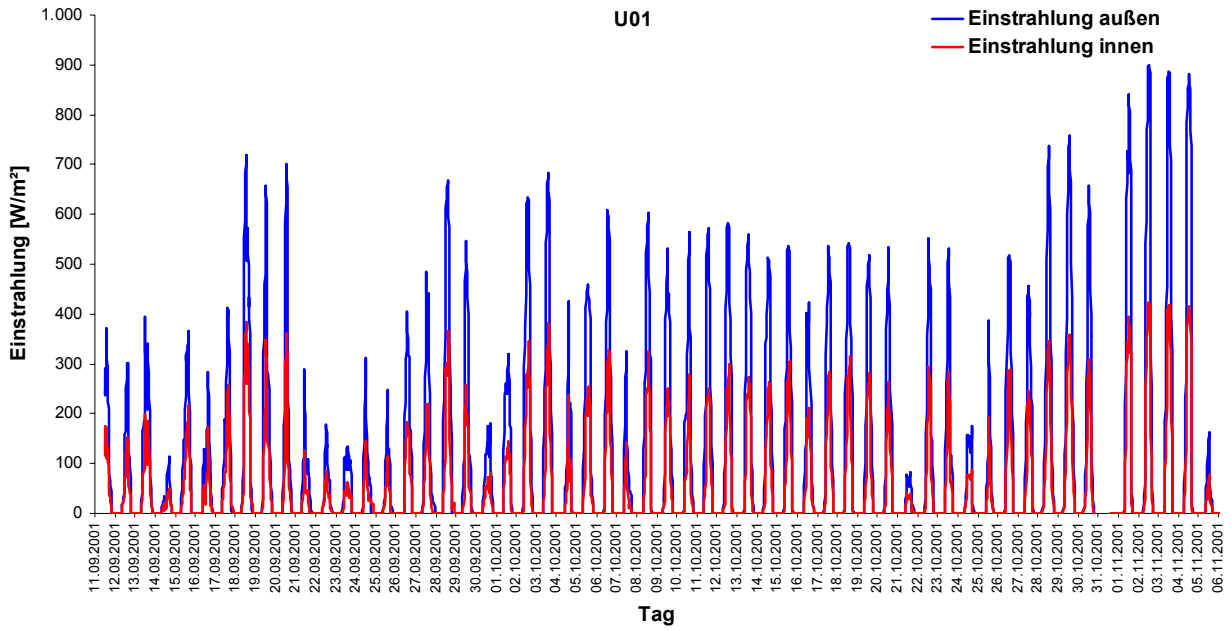


Abb. 34: Verlauf der Sonneneinstrahlung in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U01 (11.09. bis 06.11.2001)

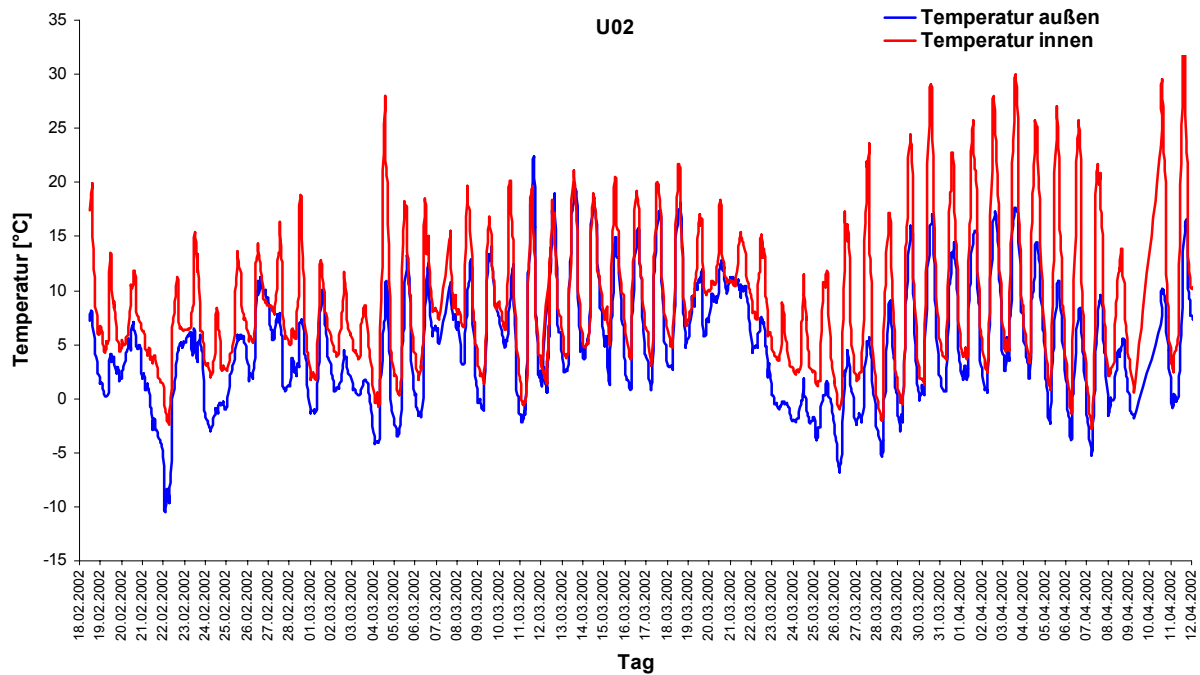


Abb. 35: Verlauf der Temperatur in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U02 (18.02. bis 12.04.2002)

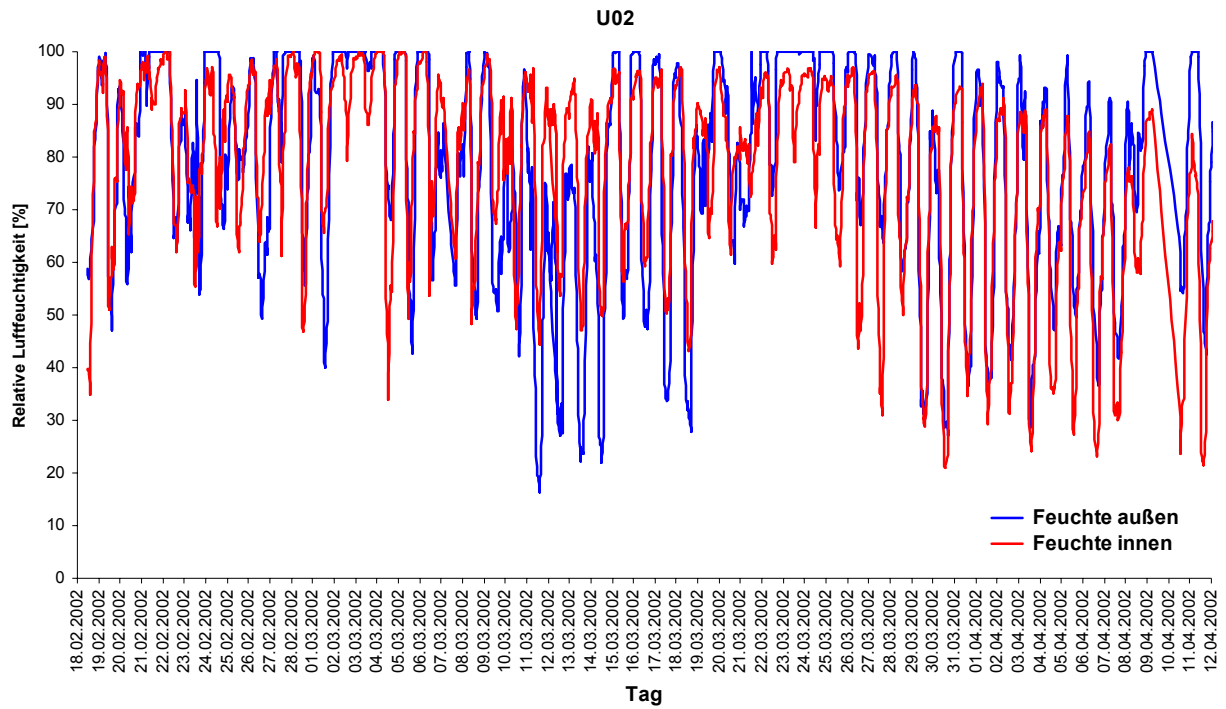


Abb. 36: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U02 (18.02. bis 12.04.2002)

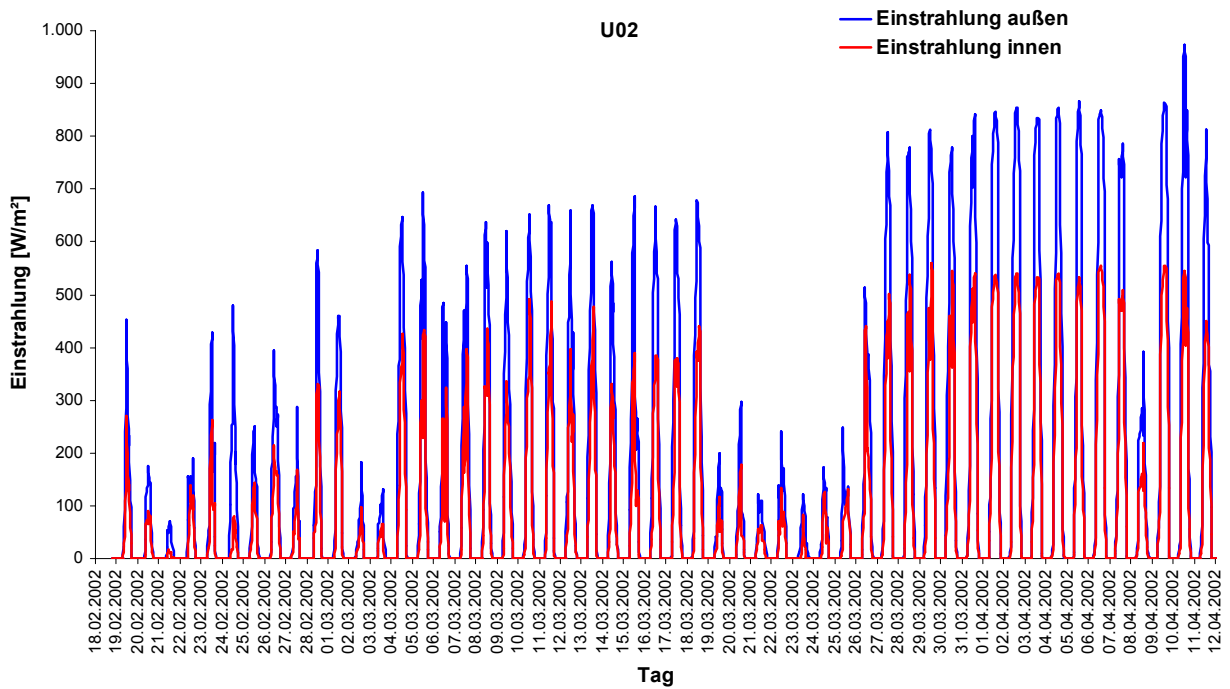


Abb. 37: Verlauf der Sonneneinstrahlung in der Umgebung und in der Trocknungshalle 1 während der U02 (18.02. bis 12.04.2002)

