

PM₁₀-Emissionen aus einem Steinbruch

A. Moldenhauer, I. Düring, U. Vogt, G. Baumbach, D. Straub, P. Fleischer

Zusammenfassung Für einen Steinbruch in Sachsen wurde aus Immissionsmessdaten sowie Rückrechnung mit LASAT eine PM₁₀-Emission pro mittlere Produktionsstunde von 17 bis 49 kg/h (ca. 49 bis 142 g/t Gut) ermittelt. Diese Emissionen setzen sich im Mittel des Auswertungszeitraums zusammen zu ca. 29 kg/h aus Prozessen durch Brechen, Sieben und Umlagern; 3 kg/h durch Lkw-Verladung (Fahren und Beladen); 1,6 kg/h durch Abwehungen und < 0,5 kg/h durch gefasste Quellen. Die projektspezifische PM₁₀-Emissionsprognose auf der Basis protokollierter Betriebsbedingungen lieferte für die mittlere Betriebsstunde eine PM₁₀-Gesamtemission von 67 kg/h. Während die Emissionen aus Produktions-, Verlade- und Transportprozessen um den Faktor 2 bis 3 überschätzt wurden, wurden die Emissionen durch Abwehungen durch die Emissionsprognose unterschätzt. Die Emissionsprognose liegt in der Summe um den Faktor 1,4 bis 4 (im Mittel Faktor 2) höher als die aus den Immissionsmessdaten abgeleitete Bandbreite der PM₁₀-Emission während der mittleren Produktionsstunde. Die PM₁₀-Emissionsprognose liegt damit auf der sicheren Seite.

PM₁₀ emissions from a quarry

Abstract For a quarry in Saxony PM₁₀ emissions of 17 to 49 kg/h per mean hour of production (equivalent to approx. 49 bis 142 g/t of good) were determined from immission data and by recalculation with LASAT. During of the evaluation period the mean emissions are composed of 29 kg/h by processes of fracturing, grading and relocation; 3 kg/h by truck loading (driving and loading); 1.6 kg/h by deflation and < 0.5 kg/h by ducted sources. The project-specific PM₁₀ emission forecast based on the recorded operation conditions yields a total emission of PM₁₀ of 67 kg/h per mean hour of operation. While the emissions from processes of production, loading and transport were overestimated by a factor of about 2 to 3, the emissions from deflation were underestimated by the exceeds the bandwidth of the PM₁₀ emission during the mean hour of production derived from the immission data by a factor of about 1.4 to 4.0 (average 2.0). Therefore this PM₁₀ emission forecast would be conservative.

1 Einleitung

PM₁₀-Emissionen und -Immissionen aus Steinbrüchen stellen eine aktuelle Fragestellung im Rahmen von Genehmigungsverfahren insbesondere bezüglich des Schutzes der benachbarten Wohnbebauung dar. Hierzu werden üblicherweise die Staubemissionen anhand der Richtlinie VDI 3790 Blatt 3 [1] und wei-

terer Literaturstellen bestimmt. In einem Forschungsprojekt im Auftrag des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie wurden PM₁₀-Messungen an einem Steinbruch [2] und darauf aufbauend Ausbreitungsberechnungen zur Ableitung der Gesamtemissionen dieses Steinbruchs für diesen Messzeitraum [3; 4] durchgeführt. Die Messungen ergaben, dass die Emissionsquellen des Steinbruchs einen relevanten Beitrag zur PM₁₀-Belastung an nahegelegenen sensiblen Punkten mit sich bringen.

In einem weiterführenden Projekt [5] erfolgte unter Nutzung der Mess- und Modellergebnisse die Ableitung von Emissionen für verschiedene Einzelprozesse. Auch die Einflüsse verschiedener meteorologischer Bedingungen auf die Emissionen, wie Windgeschwindigkeit und Niederschlag, wurden untersucht. Die Ergebnisse wurden mit theoretischen, u. a. anhand von [1] abgeleiteten Emissionen für den Steinbruch verglichen. Dies gibt Hinweise über die Güte der auch im Rahmen von Genehmigungsverfahren zu untersuchenden Grundlagen zur Emissionsbestimmung.

2 Beschreibung der Anlage

Der betrachtete Steinbruch besteht aus einem Tagebau mit Vorbrecher sowie einer Aufbereitungsanlage (Nachbrech- und Klassieranlagen). Südlich der Aufbereitungsanlage erfolgt die Lagerung sowie die Verladung per Band, teilweise wird über Radlader auch direkt an den Vorratshalden verladen. **Bild 1** gibt einen Überblick über die Lage dieser Anlagenteile.

Die Hauptanlage ist eingehaust und an Entstaubungs- und Filteranlagen angeschlossen. Die entsprechenden Schornsteinhöhen sind kleiner oder gleich der jeweiligen Gebäudehöhe, bei der Hauptanlage ca. 30 m.

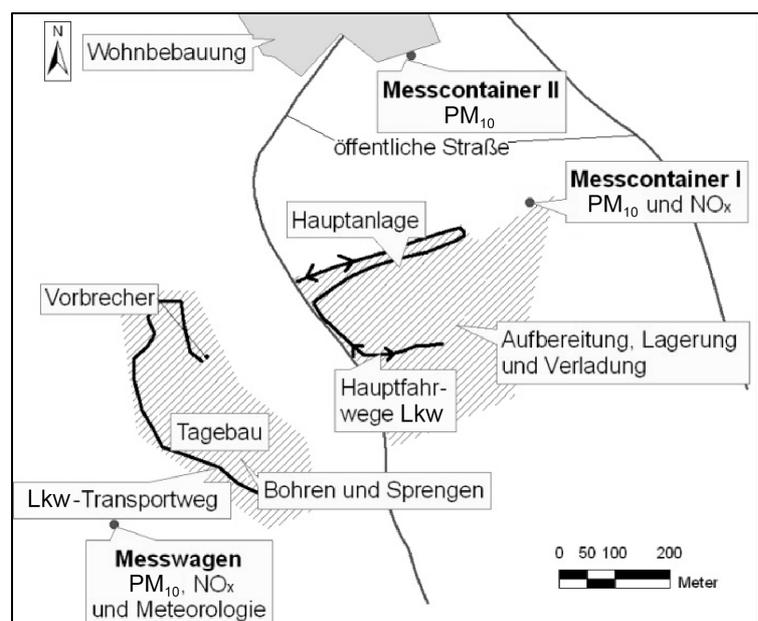


Bild 1. Übersichtslageplan mit den wesentlichsten Emissionsquellen des Steinbruchs (Hauptanlage = Nachbrech- und Klassieranlage) als schematische Lageskizze. Außerdem sind die Messstellen ausgewiesen.

Dipl.-Met. Antje Moldenhauer,

Dr. rer. nat. Ingo Düring,

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul.

Dr.-Ing. Ulrich Vogt, Prof. Dr.-Ing. G. Baumbach,
Ing. Dieter Straub,

Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und
Kraftwerkstechnik (IFK), Stuttgart.

Dipl.-Phys. Peter Fleischer,

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft
und Geologie, Dresden.

Tabelle 1. Mittelwerte der PM₁₀-Konzentrationen in µg/m³ an den Messstationen.

Zeitraum	Messwagen	Messcontainer I	Messcontainer II
Auswertezeitraum für Rückrechnung der Emissionen (9. März bis 29. April 2010)	18	41	40
Nur Tage mit Produktion und Tagesmittelwerte an allen Stationen vorhanden (9. März bis 29. April 2010)	22	57	46

Windverteilung in Prozent

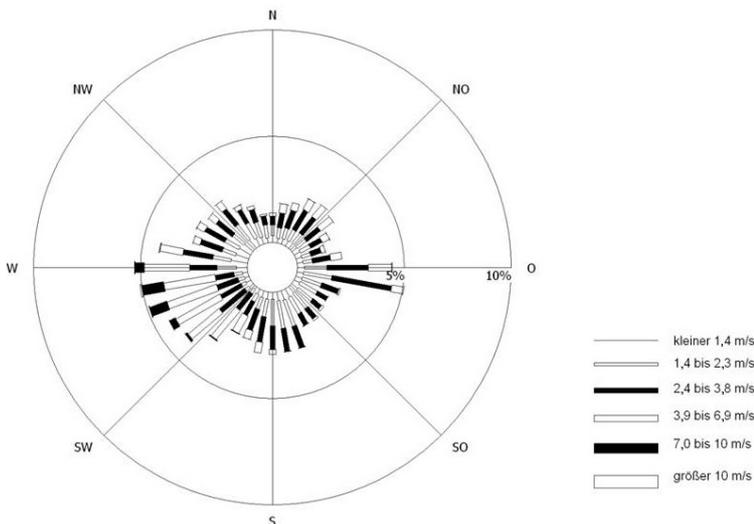


Bild 2. Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung am Messwagen im Auswertungszeitraum vom 9. März bis 29. April 2010.

wie der Messergebnisse ist in [3 bis 5] beschrieben. Die Mittelwerte für den Auswertungszeitraum vom 9. März 2010 bis zum 29. April 2010 sind für die drei Messstationen in **Tabelle 1** dargestellt.

In **Bild 2** ist die aus den Windmessdaten abgeleitete Windrichtungs- und -geschwindigkeitsverteilung im betrachteten Auswertungszeitraum dargestellt. Die Hauptwindrichtung im Auswertungszeitraum war West bis Südwest, ein Nebenmaximum trat bei Winden aus östlichen Richtungen auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 3,1 m/s.

Neben der Windrichtungs- und -geschwindigkeitsverteilung wurden vom Ultraschallanemometer (USAT) auch Informationen über die Turbulenz der Atmosphäre abgespeichert, die für die späteren Ausbreitungsrechnungen ebenfalls genutzt wurden. Die zeitliche Auflösung der meteorologischen Rohdaten betrug 1-min-Mittelwerte. Diese wurden auf 5-min-Mittelwerte aggregiert und den Ausbreitungsberechnungen zugeführt.

3 Staubmessungen

Durch das Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart wurden Immissionsmessungen der Staubkonzentrationen in der Größenklasse PM₁₀ durchgeführt [2]. Die Lage der Messstationen ist in **Bild 1** dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Messstellen so-

4 Produktionsbedingungen im Auswertungszeitraum

Die Betriebsbedingungen wurden für den Messzeitraum vom Betreiber des Steinbruchs protokolliert. Einen Überblick über die Tage mit Produktion im Untersuchungszeitraum gibt **Bild 3**. An den Wochenenden arbeiteten die Aufbereitungsanlage und die Vorbrecher nicht. Auch eine Auslagerung ins Freilager fand in diesen Zeiten nicht statt. In

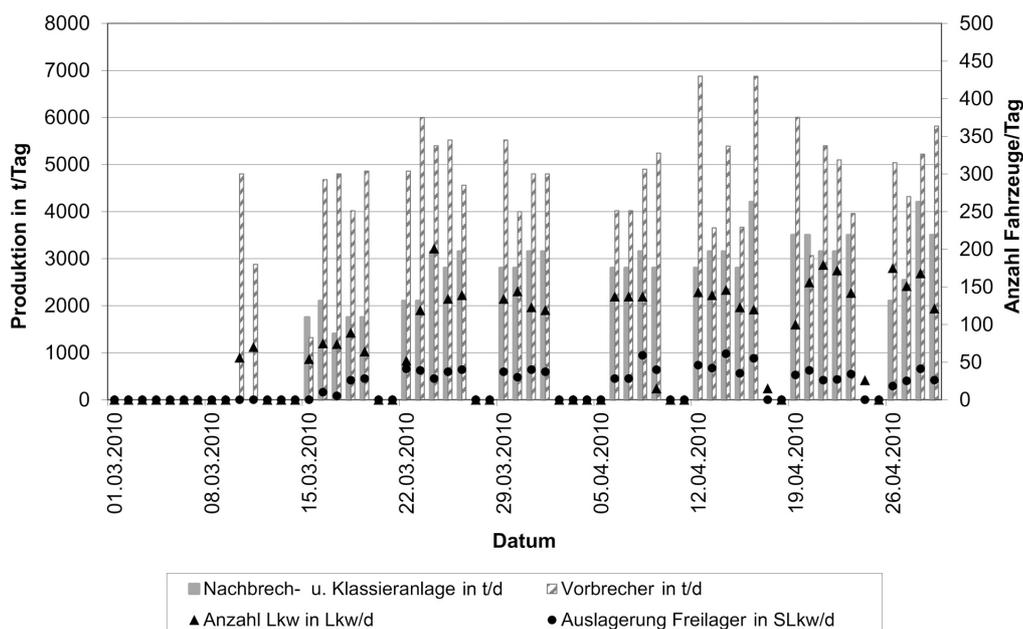


Bild 3. Tagesproduktionssummen der Nachbrech- und Klassieranlage (= Hauptanlage) und der Vorbrecher sowie Lkw-Verkehr auf dem Betriebsgelände im Untersuchungszeitraum, schwere Lkw (SLkw) nur auf Betriebsgelände selbst eingesetzt.

Ausnahmefällen (17. und 24. April 2010) fand ein Abtransport (Lkw-Verkehr) statt. Am 10. und 11. März 2010 liefen die Vorbrecher, aber nicht die Nachbrech- und Klassieranlage. An diesen beiden Tagen erfolgte auch keine Auslagerung ins Freilager. Neben den allgemeinen Betriebsbedingungen wurden auch Besonderheiten protokolliert. Dies betraf insbesondere Tage mit Bewässerung der befestigten Fahrwege und Tage mit relevantem Niederschlag.

Im Auswertungszeitraum (9. März 2010 bis 29. April 2010 = 52 Tage) ergeben sich aus den übermittelten Daten folgende emissionsrelevante Informationen:

- Gesamtmenge an abgebautem Gestein (Rhyolit): 169 000 t
- Gesamtmenge an weiter verarbeiteten Material: 90 000 t
- Zahl der Betriebstage: 35 d
- Zahl der Betriebsstunden: 477 h
- Zahl der protokollierten Regentage: 9 d
- Zahl der Tage mit Bewässerung der Fahrwege: 26 d.

5 Ergebnis der statistischen Auswertung der Messdaten sowie der LASAT-Rechnungen

Die nachfolgenden Auswertungen wurden unter folgenden Randbedingungen durchgeführt: Die an den Messpunkten gemessene PM_{10} -Zusatzbelastung (ZB) war größer als $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die mit LASAT berechnete ZB größer $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Emissionsbestimmung erfolgte, wie bereits bei [3], mithilfe der sog. Doppelsummenanalyse (engl. „double-mass analysis“).

5.1 Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen

In Bild 4 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung der PM_{10} -Zusatzbelastungen am Messcontainer I (Betriebsgelände) für die separierbaren Betriebsbedingungen gegeben.

Für die Mitwindsituationen, bei denen nur Lkw-Verkehr und -Verladung stattfand, wurde eine mittlere PM_{10} -Zusatzbelastung von $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgestellt. Diese wird maßgeblich von den Zusatzbelastungen nach Abschalten der Hauptanlage (Brech- und Klassieranlagen) am Nachmittag von 16.30 bis 18 Uhr geprägt (ZB = $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Winde kamen hierbei vor allem aus den Windrichtungssektoren der unbefestigten Fahrwege (Halden). Die Schwankungen sind aber relativ groß (Standardabweichung ca. $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Zusatzbelastungen durch Lkw-Verkehr und -Verladung vor dem Einschalten der Brecher- und Siebanlagen sind relativ gering (ZB = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Winde kamen hierbei maßgeblich ebenfalls aus den Windrichtungssektoren der unbefestigten Fahrwege. Nach Angaben des Betreibers fahren morgens die meisten Lkw aber zu den Verladestationen (befestigte Fahrwege), nur wenige zu den unbefestigten Haldenbereichen. In den Mitwindsituationen, in denen Lkw- und Bahnverladung gleichzeitig stattfanden, aber die Hauptanlage nicht in Betrieb war, lag die mittlere Zusatzbelastung bei $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit tendenziell niedriger als der Mittelwert bei aus-

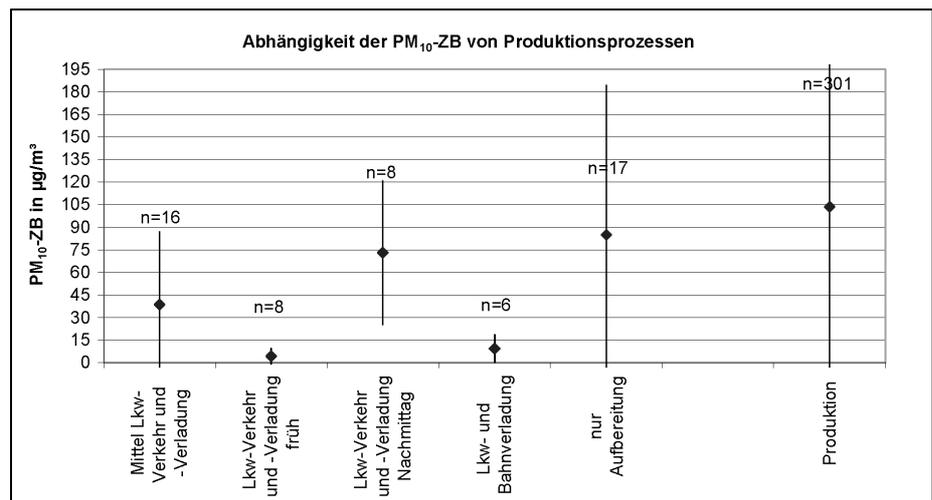


Bild 4. Abhängigkeit der PM_{10} -ZB am Messcontainer I (Betriebsgelände) von Produktionsprozessen. n = Anzahl der Halbstundenwerte. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung an.

schließlicher Lkw-Verladung. Die Winde kamen hierbei überwiegend aus den Windrichtungssektoren der befestigten Fahrwege bzw. aus Richtung Bahnverladung.

In den auswertbaren Zeiten, in denen nur die Aufbereitungsanlagen (Brecher- und Siebanlagen) in Betrieb waren, aber keine Lkw- und Bahnverladung stattfand, wurde am Messcontainer I eine mittlere PM_{10} -Zusatzbelastung von $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Dies liegt tendenziell höher als die Zusatzbelastungen aus dem Lkw-Verkehr einschließlich Verladung. Die Schwankungen der Zusatzbelastungen sind ebenfalls hoch (Standardabweichung ca. $99 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die höchste mittlere PM_{10} -Zusatzbelastung wurde für die Zeiten festgestellt, in denen alle Produktionsprozesse (Aufbereitung, Verladung) stattfanden ($104 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Schwankungen der Zusatzbelastungen sind hier ebenfalls hoch (Standardabweichung ca. $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Bild 5 sind die aus der LASAT-Rückrechnung abgeleiteten PM_{10} -Emissionen für die separierbaren Betriebsbedingungen dargestellt. Diese spiegeln im Wesentlichen die bei der Diskussion der PM_{10} -ZB aufgeführten Abhängigkeiten, korrigiert um den Einfluss unterschiedlicher Ausbreitungsbedingungen, wider. Die höchsten Emissionen wurden für die Produktionszeiten festgestellt (ca. $29,5 \text{ kg}/\text{h}$). Die durch Verladung und Lkw-Verkehr bedingten Emissionen liegen im Mittel bei ca. $3,2 \text{ kg}/\text{h}$. Die Emission durch die Aufbereitungsanlagen (Brecher- und Siebanlagen sowie Abwürfe von Förderbändern) liegt mit ca. $27,3 \text{ kg}/\text{h}$ ca. neunmal höher als die aus Lkw-Verkehr und -Verladung. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass für diese Detailauswertung jeweils nur wenige Ereignisse zur Mittelwertbildung beitragen. Längere Messzeiten sind hier für die Erhöhung der Aussage-sicherheit zwingend notwendig.

5.2 Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Ausgewertet wurden hierbei die trockenen Mitwindsituationen, in denen laut Protokollen keine Produktion und kein Verkehr stattfanden.

Die Abhängigkeit der PM_{10} -Zusatzbelastungen sowie der abgeleiteten PM_{10} -Emissionen von den Windgeschwindigkeitsklassen ist in Bild 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein signifikanter Anstieg der PM_{10} -Zusatzbelastungen ab der Windgeschwindigkeitsklasse 6 bis $7 \text{ m}/\text{s}$ eintritt. Dies deutet

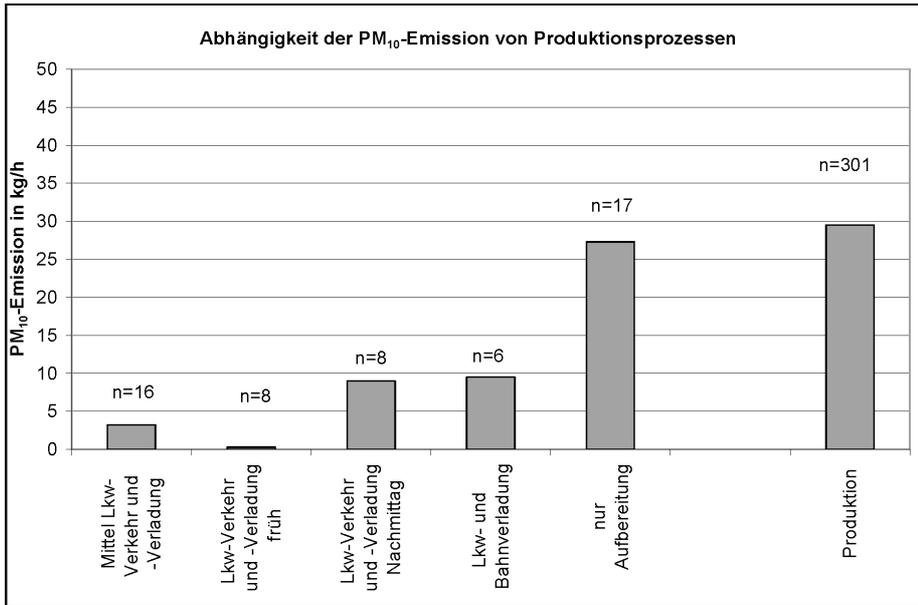


Bild 5. Abhängigkeit der PM₁₀-Emissionen von Produktionsprozessen.

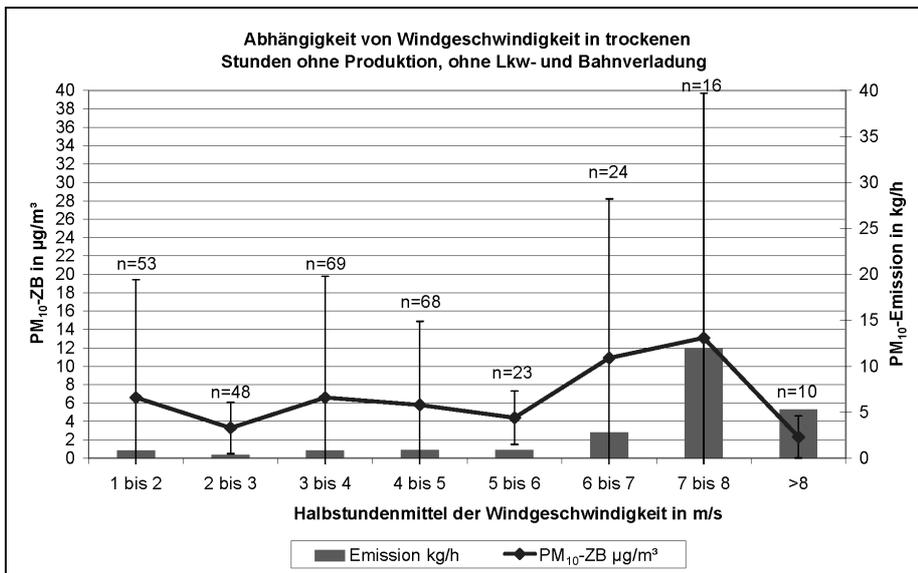


Bild 6. Abhängigkeit der PM₁₀-Zusatzbelastungen sowie der abgeleiteten PM₁₀-Emissionen von den Windgeschwindigkeitsklassen. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung bei der PM₁₀-Zusatzbelastung an. n = Anzahl von Halbstundenwerten

auf PM₁₀-Emission durch Abwehungsprozesse von den Halden bzw. Freiflächen hin. Die PM₁₀-Emission liegt bei solchen Ereignissen im Mittel bei ca. 3 bis 12 kg/h. Nach VDI 3790 Blatt 3 [1] können unter Verwendung der Winddaten aus dem Auswertungszeitraum relevante Abwehungsemissionen ab TA Luft-Windgeschwindigkeitsklasse 6 (> 5,5 m/s) berechnet werden. Dies deckt sich mit den aus den Immissionsdaten abgeleiteten Abhängigkeiten. Die bei kleinen mittleren Windgeschwindigkeiten nicht gegen Null gehenden PM₁₀-Konzentrationen und -emissionen resultieren wahrscheinlich daraus, dass hier die mittleren Windgeschwindigkeiten als Halbstundenwerte betrachtet wurden, in kleineren Zeitskalen die Windgeschwindigkeit in Böen aber deutlich höher ausfällt und damit zur Abwehung beitragen kann. Außerdem wurden in der Rückrechnung der Emissionen die Messdaten nur betrachtet, wenn die PM₁₀-Zusatzbelastungen > 0,5 µg/m³ gewesen waren. Der

Rückgang bei Windgeschwindigkeiten > 8 m/s deutet darauf hin, dass bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten ein großer Teil des mobilen Materials bereits schon bei Windgeschwindigkeiten zwischen 6 und 8 m/s weggeblasen wird und dann nicht mehr zur Verfügung steht.

Unter Beachtung der Häufigkeiten der betrachteten Windgeschwindigkeitsklassen der Auswertungsergebnisse ergibt sich eine mittlere PM₁₀-Emission durch Abwehungsprozesse von ca. 1,6 kg/h. Dieser Wert stellt den Mittelwert über alle Windgeschwindigkeiten dar.

5.3 Abhängigkeit vom Niederschlag

Für die Situation „Produktion und Niederschlagsmenge > 0 mm“ waren nur 69 Halbstundenwerte auswertbar, von denen am Container I nur 15 Werte eine Zusatzbelastung von mehr als 0,5 µg/m³ hatten. Im Mittel zeigte sich am Container I eine deutlich geringere Zusatzbelastung als für die trockenen Produktionsbedingungen, die abgeleitete Emission entsprach etwa der für die trockenen Produktionsbedingungen (32 kg/h). Für die Situation „Produktion und Niederschlagsmenge > 0,5 mm“ waren nur 15 Halbstundenwerte auswertbar, von denen keiner am Container I eine Zusatzbelastung von mehr als 0,5 µg/m³ hatte.

In den wenigen Halbstundenwerten für die Situation „Produktion und Niederschlagsmenge > 0,5 mm“, bei der der Messwagen relativ zu Container I in Lee der Produktionsanlagen stand, lagen die abgeleiteten Emissionen ca. 40 % niedriger als für die trockenen Produktionsbedingungen. Die statistische Sicherheit ist allerdings stark begrenzt.

Somit können keine statistisch abgesicherten Reduktionsfaktoren infolge Niederschlag für die PM₁₀-Zusatzbelastungen bzw. -emissionen angegeben werden.

5.4 Fazit

Aus den geschilderten Auswertungen ergibt sich bezüglich der Emissionsanteile folgendes Bild:

Die aus den Immissionsdaten am Container I (Betriebsgelände) abgeleiteten Emissionen setzen sich im Mittel des Auswertungszeitraumes zusammen zu ca.

- 29 kg/h aus Prozessen durch Brechen, Sieben und Umlagern sowie gefassten Quellen,
- 3 kg/h durch Lkw-Verladung (Fahren und Beladen),
- 0,7 kg/h durch Abwehungen bei Windgeschwindigkeiten kleiner 6 m/s und 3 bis 12 kg/h durch Abwehungen bei Windgeschwindigkeiten größer 6 m/s, im Mittel 1,6 kg/h.

6 Emissionsprognose nach VDI 3790 Blatt 3

Beim Steinbruchbetrieb können viele Emissionsquellen zur Staubemission beitragen. Im Folgenden werden die einzelnen Produktionsprozesse aufgeführt und die zugehörige Emissionsberechnung beschrieben. Grundlage für die Emissionsberechnungen waren die Angaben des Betreibers zu diesen Produktionsprozessen sowie die protokollierten Betriebsbedingungen und Produktionsmengen im Mittel des Messzeitraums.

6.1 Diffuse Emissionen

Behandelt werden hier staubförmige Emissionen aus Umschlagvorgängen, Lagerung der aufbereiteten Fraktionen sowie Zerkleinerung und Klassierung des Materials.

Die diffusen Emissionen für Umladevorgänge sowie der Lagerung werden nach [1] bestimmt. Die Einschätzung der Staubentwicklung (Gewichtungsfaktor a aus Tabelle 3 in [1]) für die einzelnen Emissionsquellen wurde anhand der Wahrnehmung bei Ortsterminen in Abstimmung mit dem Betreiber festgelegt, ebenso die mittleren Abwurfhöhen. Die Schüttgutdichten gab der Betreiber vor. Die mittleren Umschlagmengen sowie Betriebszeiten der einzelnen Prozesse ergaben sich aus den Betriebsprotokollen bzw. wurden anhand von Erfahrungswerten des Betreibers festgelegt.

Die Emissionsfaktoren für Brechen und Sieben wurden [6] entnommen. Die Emissionen im Tagebau wurden nicht betrachtet, da sie hier für die Betrachtung der Zusatzbelastung nicht relevant waren (große Abbautiefe). Folgende Prozesse wurden entsprechend der Betriebsabläufe quantifiziert:

- Brechen und Klassieren (Sieben) des Rohmaterials einschließlich Beschickung der Anlagen,
- Bandabwurf auf Halde,
- Bandabwurf auf Lkw oder Bahn,
- Verladung mit Radlader,
- Haldenlagerung.

Grundlage der Berechnungen dieser Staubemissionen ist die Produktion von 169 000 t für die betrachteten beiden Monate. Als Anteil PM_{10} an Gesamtstaub wurden entsprechend einer im Rahmen des Projekts durchgeführten Literaturrecherche 25 % angesetzt [7].

Wegen der Vielzahl der Emissionsquellen und deren Eingangsgrößen kann an dieser Stelle nicht auf die Details der Emissionsberechnung der diffusen Quellen eingegangen werden. Hier sei auf den Fachbericht [3] verwiesen.

6.2 Verkehrsbedingte Emissionen

Behandelt werden hier die Fahrbewegungen durch schwere Lkw (SLkw), Lkw (zur Abgrenzung siehe Abschn. 6.2.3) und Radlader auf befestigten und unbefestigten Fahrwegen. Die Emissionsfaktoren der Partikel setzen sich aus „motorbedingten“ und „nicht motorbedingten“ (Reifenabrieb, Staubaufwirbelung etc.) Emissionen zusammen.

6.2.1 Methodik der motorbedingten Emissionen

Die motorbedingten Emissionsfaktoren der Fahrzeuge auf den befestigten Fahrwegen werden mithilfe des „Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs HBEFA“ [8] berechnet.

6.2.2 Methodik der nicht motorbedingten Emissionen

Untersuchungen der verkehrsbedingten Partikelimmissionen zeigen, dass neben den Partikeln im Abgas auch nicht

motorbedingte Partikelemissionen zu berücksichtigen sind, hervorgerufen durch Straßen- und Bremsbelagabrieb, Aufwirbelung von auf der Straße aufliegendem Staub etc. Die Aufwirbelungsemissionen der Fahrzeuge auf den befestigten Fahrwegen werden je Fahrzeuggewicht und Staubbeladungsfaktor entsprechend dem Hinweis aus [1] nach EPA [9] berechnet.

Die Emissionen durch Fahrbewegungen der Lkw, SLkw und Radlader auf den unbefestigten Fahrwegen werden nach [1] bestimmt. Die Emissionen durch Abgase, Bremsen- und Reifenabrieb sind in der Berechnung für die unbefestigten Fahrwege enthalten.

6.2.3 Emissionen Werkverkehr

Die Emissionsberechnungen für Lkw/SLkw werden für fünf Streckenabschnitte im Bereich der Aufbereitungsanlagen durchgeführt. Die Emissionen im Tagebau werden nicht weiter betrachtet, da diese entsprechend der Immissionsauswertungen keinen relevanten Beitrag zur Zusatzbelastung liefern. Die Abschnitte 1, 2, 3 und 5 sind befestigte Abschnitte, im Bereich 4 wird auf unbefestigten Wegen gefahren. Weiterhin werden Radlader zur Beladung der Lkw/SLkw auf den Auslagerungsflächen eingesetzt (unbefestigte Fahrwege). Bei den Emissionsberechnungen wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

Die eingesetzten Lkw haben ein Leergewicht von 15 t und eine Beladung von je 22 t. Die eingesetzten SLkw haben ein Leergewicht von 35 t und eine Beladung von je 40 t. Die Radlader haben ein Leergewicht von 17 t und eine mittlere Beladung von 8 t. Die Anzahl eingesetzter Lkw und SLkw wurden für jeden Tag in den Betriebsprotokollen angegeben. Es wurde angesetzt, dass 50 % der Lkw an den Verladestationen und 50 % auf den Freiflächen (Halden) beladen werden. Die Lkw-Fahrten ergeben sich durch die Multiplikation der Anzahl mit zwei (Hin- und Rückfahrt). Der Radladerverkehr wurde aus den Umschlagmengen am Freilager abgeschätzt. Lkw-Fahrten gab es an 35 Tagen des Auswertungszeitraums. Im Mittel fanden z. B. im befestigten Abschnitt 1 (von der Einfahrt bis zur Waage) 237 Lkw-Fahrten pro Tag statt, im unbefestigten Abschnitt 4 (Auslagerungsbereich) 177 Lkw-Fahrten pro Tag.

Laut den Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hat es an acht der Tage mit Lkw-Verkehr geregnet. An 22 Tagen wurden die Fahrwege bewässert bzw. die Bewässerungsanlage eingeschaltet. Die Regenkorrektur wurde entsprechend [1] bzw. [9] durchgeführt. Die Emissionsreduktion an Tagen mit Bewässerung für die befestigte Fahrstrecke 1 wurde wegen der kontinuierlichen Bewässerung (Bewässerungsanlage) entsprechend [10] zu 60 % festgelegt. Bei den befestigten Fahrwegen der Strecken 2, 3 und 5 wurde wegen der sporadischen Bewässerung mittels Wasserwagen die Reduktion analog zu den Regenereignissen zu 25 % und auf den unbefestigten Fahrwegen der Strecke 4 wegen der sporadischen Bewässerung mittels Wasserwagen zu 30 % (die Hälfte der Minderung bei kontinuierlicher Bewässerung entsprechend [10]) angesetzt.

Als „Silt Load“ für die befestigten Streckenabschnitte wurden 5 g/m^2 für die Abschnitte 1, 2 und 5 bzw. 8 g/m^2 für Abschnitt 3 angesetzt. Als Feinkornanteil S für den unbefestigten Abschnitt 4 wurde nach [1] ein Wert von 10 % (Steinbruch Werkstraße) verwendet.

Für jeden Tag wurden der PM_{10} -Emissionsfaktor sowie die tagesmittlere PM_{10} -Emissionsmenge berechnet. Nach Divi-

Tabelle 2. Ergebnisse der PM₁₀-Emissionsberechnungen für die Fahrwege (SLkw/Lkw- und Radladerverkehr) im Auswertungszeitraum vom 9. März bis 29. April 2010. Fzg: Fahrzeug

Strecke	1	2	3	4	5	Außenlager (Radlader) im Bereich Strecke 4	Summe
Streckenlänge in m	270	210	120	250	60	100	–
Mittlerer PM ₁₀ -Emissionsfaktor in g/(km · Fzg)	42	83	130	727	83	314	–
Mittlere PM ₁₀ -Emissionsmenge in kg/d	2,7	3,1	2,8	32,2	0,5	5,3	46,6
Mittlere PM ₁₀ -Emissionsmenge während der Produktion in kg/h	0,2	0,2	0,2	2,6	0,1	0,4	3,7
Anteil an Summe in %	6	7	6	69	1	11	100

sion durch die Anzahl von Betriebsstunden am jeweiligen Tag ergab sich die Emissionsmenge in kg/h. Daraus wurde jeweils der Mittelwert über den Auswertungszeitraum gebildet. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Im Mittel werden somit 47 kg PM₁₀/d bzw. 3,7 kg pro Betriebsstunde emittiert. 80 % entfallen auf die unbefestigten und 20 % auf die befestigten Strecken.

6.3 Gefasste Emissionen

Aus Emissionsmessungen im Jahr 2009 wurden für den ungestörten Dauerbetrieb aller gefassten Quellen in der Summe 0,41 kg/h Gesamtstaub ermittelt. Berücksichtigt man einen PM₁₀-Anteil am Gesamtstaub von 85 % [11], dann kann die PM₁₀-Emissionsmenge aus den gefassten Quellen zu 0,35 kg/h abgeschätzt werden.

6.4 Emissionsbilanz

Die theoretisch abgeleiteten Emissionen der Anlage lassen sich wie folgt zuordnen:

- 5 % der Gesamt-PM₁₀-Emissionen dem Lkw- und Radladerverkehr,
- 6 % den Verladevorgängen bei der Lkw-Verladung mit Radladern,
- 1 % der Bahnverladung,
- 5 % der Haldenlagerung (Abwehungen),
- 85 % den Abwürfen von Förderbändern,
- < 0,5 % dem Brechen und Sieben sowie
- < 0,5 % den gefassten Quellen.

Der größte Anteil der PM₁₀-Emissionen wird entsprechend dieser Berechnungen durch diffuse Quellen, maßgeblich durch Abwürfe von Förderbändern (85 %), verursacht. Lkw-/SLkw-Transport einschließlich Verladung des Materials mittels Radlader machen bei diesen Modellrechnungen unter Beachtung der Berieselungsanlage und der Befeuchtungen mit Wasserwagen ca. 11 % der Emissionsmenge aus. Die Bahnverladungen und die gefassten Quellen (Entstaubungsanlagen) spielen keine relevante Rolle.

Hinweis: In den Emissionsberechnungen wurde richtlinienkonform für die Hauptanlage (Nachbrech- und Klasieranlage) angesetzt, dass alle Emissionen als gefasste Quellen über die Entstaubungsanlage abgeleitet werden. Die Hauptanlage ist allerdings nicht komplett eingehaust, sondern zum Zeitpunkt der Messungen im Bodenbereich bis zu einer Höhe von etwa 2 m offen. Beobachtungen vor Ort zeigten, dass hier maßgeblich von den Förderbändern feines Material zu Boden fällt, durch Windangriff wieder aufgewirbelt wird und als Emissionsquelle zur Verfügung steht. Dieser

Effekt ist in den Emissionsberechnungen nicht enthalten, könnte aber eine zusätzliche relevante Emissionsquelle sein.

7 Vergleich der Messergebnisse mit den theoretisch abgeleiteten Emissionen

7.1 Vergleich der prognostizierten Gesamtemissionen mit den aus den Immissionsmessungen abgeleiteten Emissionsmengen

In [3; 4] wurde aus den Immissionsmessdaten auf die Emissionsmengen der Aufbereitung des Steinbruchs zurückgerechnet. Zu Stunden, in denen die Aufbereitungsanlagen in Betrieb waren, wurde bei gleichzeitiger Produktion eine mittlere Emission von 38 kg/h abgeleitet. Bezieht man zusätzlich die Stunden mit ein, in denen nur Lkw-Verkehr und Verladungen stattfanden, ergibt sich eine mittlere Emission von 34 kg/h (bei einer Bandbreite von 17 bis 49 kg/h). Diese Werte sind repräsentativ für die Monate März und April 2010 für eine Produktionsmenge von ca. 169 000 t. An 35 Tagen wurde im Auswertungszeitraum produziert. Die durchschnittliche Produktionszeit pro Tag betrug 14 Stunden. Die durchschnittliche Produktionsmenge betrug somit 345 t pro Produktionsstunde.

Die in Kap. 6 beschriebene Emissionsprognose lieferte für die mittlere Produktionsstunde eine PM₁₀-Gesamtemission von 67 kg/h. Diese liegt um den Faktor 1,4 bis 4,0 höher als die aus den Immissionsdaten abgeleitete Bandbreite der Emission während der mittleren Produktionsstunde.

7.2 Vergleich der Emissionen für einzelne Prozesse mit den aus Kap. 6 abgeleiteten Emissionsmengen

Tabelle 2 im Beitrag von *Düring/Sörgel* (siehe Seite 45 ff. in dieser Ausgabe) vergleicht die PM₁₀-Emissionen aus der Emissionsprognose mit den aus den Immissionsdaten abgeleiteten für die mittlere Betriebsstunde.

Die Emissionen aus der Lkw-Verladung einschließlich Transport werden durch die Emissionsprognose um den Faktor 2 bis 3 überschätzt, ebenso die Emissionen aus Brechen, Sieben, Umlagern, gefassten Quellen sowie Bahnverladung. Die Emissionen aus den Abwehungsprozessen werden durch die Emissionsprognose um den Faktor 2 unterschätzt.

8 Ausblick

Die Untersuchungen ergaben, dass der maßgebende Anteil der PM₁₀-Emissionen durch die nicht eingehausten Bandabwürfe verursacht wird. Minderungsmaßnahmen, z. B. Verringerung der Fallhöhen, Verringerung der Staubneigung etc., sollten daher hier ansetzen. Die hier aus den Immissionsdaten abgeleiteten Emissionen haben nur eine geringe statistische Sicherheit wegen des nur kurzen Auswertungszeitraums von zwei Monaten. Weitere Messungen sollten den Sommer und Winter mit Betrieb des Steinbruchs einschließen, um auch die Emissionen und Immissionen wäh-

rend dieser meteorologischen Bedingungen mit zu erfassen. Durch längere Messzeitreihen ließe sich auch der Einfluss von Niederschlag auf die PM₁₀-Emissionen quantifizieren. Messungen an anderen Steinbrüchen würden die Situation unter anderen Betriebsbedingungen bzw. bei anderen Materialien aufzeigen. Eine KorngröÙenselektive Erfassung der Partikel, z. B. durch Kaskaden-Impaktoren, könnte weitere Schlussfolgerungen zu den Emissionsprozessen und zur gesundheitlichen Relevanz der PM₁₀-Konzentrationen aus diesem Steinbruch geben. Parallelmessungen von TSP, PM₁₀, PM_{2,5} sowie weiterer TA-Luft-KorngröÙen würden da-

zu beitragen, die Erkenntnislücke zwischen den nach [1] zu berechnenden Gesamtstaub(TSP)-Emissionen und den für die Immissionsprognose notwendigen Staub-Emissionen verteilt auf die TA-Luft-KorngröÙen zu verringern.

Danksagung

Diese Untersuchung wurde durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie finanziert.

Literatur

- [1] VDI 3790 Blatt 3: Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern. Berlin: Beuth 2010.
- [2] Ermittlung von PM₁₀-Emissionen aus einem Steinbruch. Bericht über die durchgeführten Messungen am Steinbruch. IFK – Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart. Februar 2011.
- [3] *Düring, I.; Moldenhauer, A.; Sörgel, C.; Lohmeyer, A.*: Ermittlung von PM₁₀-Emissionen aus einem Steinbruch. Bericht im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Februar 2011.
- [4] *Düring, I.; Moldenhaier, A.; Vogt, U.; Baumbach, G.; Straub, D.; Fleischer, P.*: Ermittlung von PM₁₀-Emissionen aus einem Steinbruch. Immissionsschutz 16 (2011) Nr. 4, S. 178-183.
- [5] *Düring, I.; Moldenhauer, A.; Lohmeyer, A.*: Emissionen aus einem Steinbruch Teil 2 – Auswertung Messdaten und Emissionsprognose nach VDI 3790 Bl. 3. Bericht im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dezember 2011.
- [6] Compilation of air pollutant emission factors. AP 42, 5th Ed. Vol. I, Chap. 11: Mineral Products Industry, Sec. 11.19.2.: Crushed stone processing and pulverized mineral processing. U.S. Environmental Protection Agency. Washington D.C. 2004.
- [7] *Kummer, V.; van der Pütten, N.; Schneble, H.; Wagner, R.; Winkels, H.-J.*: Ermittlung des PM₁₀-Anteils an den Gesamtstaubemissionen von Bauschuttzubereitungsanlagen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2010) Nr. 11/12, S. 478-482.
- [8] Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1/Januar 2010. Hrsg.: Umweltbundesamt Berlin. www.hbefa.net/d/start.html
- [9] Compilation of air pollutant emission factors. AP 42, 5th Ed. Vol. I, Chap. 13: Miscellaneous sources, Sect. 13.2.1.: Paved roads. U.S. Environmental Protection Agency. Washington D.C. 2011.
- [10] *Strobl, A.*: Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit des Niederschlages an baustellenbeeinflussten Immissionsmessstellen. Beitrag im Rahmen des 1. Österreichischen Workshops Ausbreitungsmodellierung von Luftschadstoffen, Oktober 2009. www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/11175465_19222537/0488932e/Ausbreitungsmodellierung%20von%20LuftschadstoffenLow.pdf
- [11] *Pregger, T.*: Ermittlung und Analyse der Emissionen und Potenziale zur Minderung primärer anthropogener Feinstäube in Deutschland. Dissertation, Universität Stuttgart 2006.