

Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik  
der RWTH-Aachen

**Untersuchungen zum Einfluss der Rohstoffgewinnung auf die Feinstaubkonzentration in ihrer Umgebung - Quellenidentifizierung und -quantifizierung zur gezielten Entwicklung staubmindernder Maßnahmen**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 27092-21/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Rebeca Böhner M.A.

Februar 2012

RWTH-Aachen

Lehrstuhl und Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik

Lochnerstraße 4-20

52064 Aachen

Tel.: +49 (0)241 - 80 95683

Fax: +49 (0)241 - 80 92250

[www.bergbaukunde.de](http://www.bergbaukunde.de)

**1 Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az <b>27092-21/0</b>	Referat <b>21</b>	Fördersumme	<b>120.000,00 €</b>
----------------------	-------------------	-------------	---------------------

**Antragstitel** Untersuchungen zum Einfluss der Rohstoffgewinnung auf die Feinstaubkonzentration in ihrer Umgebung – Quellenidentifizierung und –quantifizierung zur gezielten Entwicklung von staubmindernden Maßnahmen

**Stichworte** Feinstaub, Steine- und Erdenindustrie, Minderungsmaßnahmen

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>30 Monate</b>	<b>14.05.2009</b>	<b>13.10.2011</b>	<b>1</b>
Zwischenberichte	14.12.2009	14.07.2010	

<b>Bewilligungsempfänger</b>	RWTH-Aachen Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik (Bergbaukunde III) Lochnerstrasse 4-20  52064 Aachen	Tel	0241-8095683
		Fax	0241-8092250
		Projektleitung Prof. Dr. C. Niemann-Delius	
		Bearbeiter Rebeca Böhner M.A.	

**Kooperationspartner** Die beteiligten Untersuchungsbetriebe werden nicht genannt, dies ist Gegenstand der Kooperationsvereinbarungen.

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Feinstaub gilt in höheren Konzentrationen als Luftschadstoff für Mensch und Umwelt. Durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz sind Grenzwerte vorgeschrieben, deren Einhaltung jedoch nicht immer und überall erreicht werden kann. Tagebaue sind als potentielle Feinstaubemittenten für die Luftqualität von Interesse. Gegenstand dieses Vorhabens ist es daher, die wesentlichen Feinstaubemittenten im Tagebau zu identifizieren und ihr Emissionspotential zu quantifizieren. Darüber hinaus soll ihr Wirkungsbereich ermittelt werden. Die Wirkung von Minderungsmaßnahmen in den Tagebauen soll bewertet und in einer Typisierung der Betriebe berücksichtigt werden. Diese dient anderen Betrieben zur Bewertung über die Notwendigkeit von Staubschutzmaßnahmen. Darüber hinaus werden in einem Maßnahmenkatalog konkrete Mittel zur Emissionsminderung zusammengestellt.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Es wurden in zwölf Tagebauen der Steine- und Erdenindustrie Messkampagnen durchgeführt, um sowohl die von ihnen ausgehenden Emissionen als auch die Immissionen in deren Umgebung zu ermitteln. Messtechnisch erfasst wurden die signifikanten Emittenten, diese umfassten Betriebsanlagen der Aufbereitung, Übergabestellen sowie Fahrwege. Mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen wurden Immissionskataster erstellt, um den Wirkungsbereich der Emittenten abzubilden. Anhand der ermittelten Immissionen im Nahbereich der Tagebaue sowie der Hintergrundwerte der Landesumweltämter wurde die von den Untersuchungsbetrieben ausgehende Zusatzbelastung berechnet. Dadurch konnte die Anzahl von Grenzwertüberschreitungen im Untersuchungszeitraum ermittelt werden. Darüber hinaus wurden die Einflüsse von Topographie und Meteorologie auf die Feinstaubbelastung hin untersucht und anhand von Ausbreitungsrechnungen quantifiziert. Für eine Ursachenanalyse auftretender Emissionen wurden Materialproben im Labor hinsichtlich ihrer Staubungsneigung untersucht und ausgewertet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Typisierung der Tagebaue zur Bewertung und Empfehlung von Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaubemissionen vorgenommen.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die maßgeblichen Feinstaubemittenten in Tagebauen konnten identifiziert und ihre Emissionen quantifiziert werden. Grundsätzlich weisen Festgesteinstagebaue ein deutlich höheres Emissionspotential als Lockergesteinstagebaue auf. Aufgrund des wesentlichen Einflusses meteorologischer und topographischer Parameter kommt es jedoch nicht zwingend zu erhöhten Immissionen im Sinne von Grenzwertüberschreitungen in ihrer Umgebung.

Besonders hohe Feinstaubemissionen gehen von Aufbereitungsanlagen wie Brechern, Materialübergaben und Siebanlagen aus. Auch an Verladestellen wird, trotz vorhandener Vorrichtungen zur Staubabsaugung, Feinstaub freigesetzt. Darüber hinaus konnten Fahrwege als wesentliche Feinstaubquelle erkannt werden.

Emittenten im Tagebau stellen überwiegend diffuse Feinstaubquellen dar. Die Berechnung der Emissionsraten ist daher mit Unsicherheiten verbunden. Die nach VDI-Richtlinie 3790 Blatt 3 beschriebene Berechnung von Emissionsraten ist aufgrund der unterschiedlichen Materialbeschaffenheiten im Laufe der Aufbereitungsschritte sowie prozessbedingt nicht adäquat anwendbar. Die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführte Methode zur Quantifizierung der Quellstärken auf Grundlage von Messwerten und Durchgangsflächen der Feinstaubkonzentration erzielt ein der Wirklichkeit nahekommendes Ergebnis, hier besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf.

Durch Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaubemissionen können diese erheblich vermindert werden. Insbesondere die Einhausung von Brechern und Bandanlagen im Festgesteinstagebau zeigt eine deutliche Wirkung. Jedoch ist die Feinstaubkonzentration an offenen Anlagenteilen dann besonders hoch, da die Emissionen dort konzentriert austreten. Hier sollten zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Für die Reduzierung der Emissionen von Fahrwegen stellt die Bewässerung eine effektive Maßnahme dar. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass diese regelmäßig wiederholt wird, da die mindernde Wirkung nur von kurzer Dauer ist.

Die Messungen wurden während der Betriebszeiträume durchgeführt, daher wurden sowohl zur Berechnung der Immissions-Zusatzbelastung als auch zur Berechnung der tatsächlichen Tagesmittelwerte Daten aus dem Messnetz der Landesumweltämter zur Hintergrundbelastung herangezogen. Demnach kam es nur an fünf von 157 Messtagen zu einer Überschreitung des zulässigen Tagesmittelwertes von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Grundsätzlich ergaben die Ausbreitungsrechnungen geringere Konzentrationen an den Immissionspunkten. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass zwar die wesentlichen Feinstaubquellen im Tagebau untersucht wurden, jedoch weitere diffuse Emissionen, beispielsweise aus der Gewinnungsfläche, nicht messtechnisch erfasst werden konnten. Darüber hinaus wurde in den Simulationen nur die Zusatzbelastung berücksichtigt.

Anhand der vorgenommenen Typisierung der Untersuchungsbetriebe wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt. In diesem sind spezifische zu treffende Maßnahmen zur Emissionsminderung für die unterschiedlichen Tagebautypen zusammengestellt. Dies erlaubt eine einfache Beurteilung darüber, ob eine Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen im Betrieb besteht und welche Maßnahmen umgesetzt werden können und sollten. Die Nutzung des Maßnahmenkataloges kann daher zur Umweltentlastung beitragen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Ergebnisse werden in der Fachzeitschrift „World of Mining - Surface and Underground“ veröffentlicht. Es sind weitere Veröffentlichungen vorgesehen.

### **Fazit**

Durch die Forschungsarbeit wurden die signifikanten Feinstaubquellen im Tagebau ermittelt und ihre Emissionen quantifiziert. Zugunsten einer gesicherten Datenbasis sollten Messkampagnen in zukünftigen Untersuchungen längere Zeiträume umfassen sowie witterungsbedingt emissionschwache Zeiträume einbeziehen. Für die Erfassung diffuser Emissionen sowie für die Berechnung von Emissionsraten sollte weiterhin an praktikablen Lösungen gearbeitet werden. Die durch Tagebaue verursachte Zusatzbelastung in deren Umfeld ist im Rahmen der Untersuchung als gering zu bewerten. Anhand des erstellten Maßnahmenkataloges können im konkreten Fall die Handlungsnotwendigkeit bewertet und spezifische Maßnahmen ergriffen werden.

# Inhaltsverzeichnis

## *Abbildungsverzeichnis*

## *Tabellenverzeichnis*

<b>1. Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Methodik und Ergebnisse</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1 Messkampagnen in den Untersuchungsbetrieben</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2 Bewertung der Feinstaubquellen und Minderungsmaßnahmen</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3 Ergebnisse der Immissionsmessungen</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4 Berechnung von Immissionskatastern</b> .....	<b>30</b>
<b>3.5 Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Feinstaubbelastung</b> .....	<b>33</b>
3.5.1 Einfluss von Meteorologie und Topographie .....	33
3.5.2 Einfluss von Minderungsmaßnahmen .....	37
3.5.3 Einfluss von Grünstreifen .....	38
<b>3.6 Beurteilung des Staubungsverhaltens</b> .....	<b>40</b>
<b>3.7 Typisierung und Maßnahmen zur Emissionsminderung</b> .....	<b>43</b>
3.7.1 Typ 1: Trockenabgrabung mit einfacher Aufbereitung .....	43
3.7.2 Typ 2: Nassabgrabung mit mehrstufiger Aufbereitung.....	44
3.7.3 Typ 3: Trockenabgrabung mit mehrstufiger Aufbereitung .....	45
3.7.4 Typ 4: Festgesteinstagebaue.....	45
<b>4. Fazit</b> .....	<b>48</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>50</b>
<b>Anhang I Messwerte</b> .....	<b>52</b>
<b>Anhang II Emissionsraten</b> .....	<b>57</b>
<b>Anhang III Ergebnisse zum Staubungsverhalten</b> .....	<b>59</b>
<b>Anhang IV Immissionskonzentrationen</b> .....	<b>61</b>
<b>Anhang V Ermittlung von Überschreitungstagen</b> .....	<b>63</b>
<b>Anhang VI Maßnahmenkatalog nach Typisierung</b> .....	<b>64</b>
<b>Anhang VII Immissionskataster</b> .....	<b>65</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Untersuchungsschritte.....	10
Abbildung 2: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-1 .....	15
Abbildung 3: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-2 .....	16
Abbildung 4: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-3 .....	16
Abbildung 5: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-4 .....	17
Abbildung 6: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-5 .....	18
Abbildung 7: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-6 .....	19
Abbildung 8: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-7 .....	19
Abbildung 9: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-8 .....	20
Abbildung 10: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-9 .....	21
Abbildung 11: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-10 .....	21
Abbildung 12: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-11 .....	22
Abbildung 13: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-12 .....	22
Abbildung 14: Übersicht der Tagebaue und ihrer Emittentengruppen.....	23
Abbildung 15: Anteile der Emittenten im Lockergesteinstagebau .....	24
Abbildung 16: Anteile der Emittenten im Festgesteinstagebau .....	25
Abbildung 17: Feinstaubbelastung durch Brecher mit und ohne Einhausung .....	26
Abbildung 18: Vergleich der Feinstaubkonzentrationen an Fahrwegen .....	27
Abbildung 19: Konzentrationsverlauf an einem Fahrweg mit Bewässerungsmaßnahme.....	28
Abbildung 20: Konzentrationsverlauf von PM10 während einer Sprengung .....	29
Abbildung 21: Ergebnisdatei einer Ausbreitungsrechnung.....	32
Abbildung 22: Feinstaubbelastung in gegliedertem und ebenem Gelände .....	34
Abbildung 23: Ausbreitungsszenario für gegliedertes Gelände.....	35
Abbildung 24: Ausbreitungsszenario bei Veränderung der Emissionsposition.....	36
Abbildung 25: Einfluss des Tagebauzuschnitts auf die Feinstaubbelastung .....	36
Abbildung 26: Immissionssituation nach Einsatz von Minderungsmaßnahmen .....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Untersuchungsbetriebe .....	12
Tabelle 2: Klassifizierung zur Beurteilung der Staubungskenngrößen $W_R$ und $W_i$ [IGF11].....	41
Tabelle 3: Materialproben zur Untersuchung des Staubungsverhaltens .....	41
Tabelle 4: Klassifizierung der Materialproben [IGF11].....	42

## 1. Zusammenfassung

Dem Forschungsbericht liegen Untersuchungen zu Feinstaubemissionen und -immissionen von zwölf Gewinnungsbetrieben der Steine- und Erdenindustrie zu Grunde. Dabei waren insbesondere folgende Aspekte Gegenstand der Untersuchungen: Welches sind die maßgeblichen Feinstaubquellen im Tagebau und wie hoch ist ihr Emissionspotential? Wie wirken sich diese Emissionen unter Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse, der Topographie und vorhandener Minderungsmaßnahmen aus? Wo ist es sinnvoll, Maßnahmen einzusetzen und wie wirksam sind diese?

Die maßgeblichen Feinstaubemittenten in Tagebauen konnten identifiziert und ihr Emissionspotential mit Hilfe von insgesamt 278 Messreihen an 87 Messpunkten quantifiziert werden. Tendenziell ist bei den Festgesteinstagebauen ein deutlich höheres Emissionspotential gegenüber den Betrieben im Lockergestein festzustellen. Besonders hohe Feinstaubemissionen wurden an Aggregaten der Aufbereitungsanlagen wie Brechern und Sieben festgestellt, ferner an Übergabe- und Verladestellen sowie an Fahrwegen. Schutzmaßnahmen senken die Emissionen deutlich.

Von 157 Immissionsmessungen an 68 Messpunkten an der Peripherie der Betriebe weisen 27 Punkte während der durchschnittlich achtstündigen Betriebszeit erhöhte Werte auf. Bezogen auf den Vorgabewert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pro Tag, der nicht mehr als 35 Mal im Jahr überschritten werden darf, ist jedoch nur an vier Messtagen eine Überschreitung im 24-Stunden-Zeitraum zu konstatieren. Dabei waren drei der Messpunkte durch Fahrwege in unmittelbarer Nähe einer erhöhten Emission ausgesetzt.

Alle durchgeführten Emissions- wie Immissionsmessungen sind als Stichproben zur Ermittlung von Anhaltswerten zu betrachten. Einer Messreihe lag in der Regel die Betriebszeit eines Tages (8-10 h) zu Grunde. Messungen fanden nur an Tagen ohne Regen statt, an denen die Messgenauigkeit der eingesetzten Geräte gewährleistet war und welche darüber hinaus als emissionsreich zu betrachten sind. Die dadurch tendenziell erhöhten Werte wurden ohne Korrekturfaktor verwendet.

Die durchgeführten Ausbreitungsrechnungen zur Erstellung von Immissionskatastern in den Betrieben berücksichtigen jeweils zwischen drei bis elf Emissionsschwerpunkte bzw. -quellen. Sie lassen ebenso wie die Immissionsmessungen den Schluss zu, dass Zusatzbelastungen durch die Betriebe nur sehr eingeschränkt über die Betriebsfläche hinaus wirksam werden.

In den meisten Fällen lagen die gemessenen Immissionswerte an der Tagebauperipherie über der zu Grunde gelegten Hintergrundbelastung von Referenzstationen der Landesumweltämter, ohne dass die Simulation eine Zusatzbelastung auswies. Dies ist darauf zurück zu führen, dass in der Simulation nur identifizierte und quantifizierte

Quellen berücksichtigt wurden, während in der Realität auch diffuse Quellen vorhanden sind.

Um die Emissionsschwerpunkte herum weisen die simulierten Feinstaubkataster teilweise eng begrenzte Bereiche mit erheblichen Belastungswerten aus. Diese überschreiten einerseits zwar die Vorgaben des BImSchG deutlich, in keinem Fall jedoch die Vorgaben für Arbeitsstätten entsprechend TRGS 900 verletzen.

Erwartungsgemäß zeigen die Ausbreitungsrechnungen den erheblichen Einfluss der meteorologischen Verhältnisse, insbesondere die rasche Verdünnungswirkung in Folge hoher Windgeschwindigkeiten. In Szenarien, in denen die Topographie zu einer Reduktion der Windgeschwindigkeit führt, weist die Simulation deutlich erhöhte Immissionswerte in geschützten Bereichen auf.

Auf Grundlage gleicher oder ähnlicher Charakteristika erfolgte eine Typisierung der Untersuchungsbetriebe. Diese beinhaltet die Art des Abbaus (Fest-/Lockergestein), die Gewinnungs- und Aufbereitungstechnologie sowie eingesetzte Schutzmaßnahmen. Anhand dieser Kriterien wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt. Hier sind sowohl als notwendig erachtete, als auch noch auf ihre Notwendigkeit zu prüfende, zusätzliche Maßnahmen zur Emissionsminderung der Typisierung entsprechend aufgeführt.

Die untersuchten Betriebe sind aufgrund des Kooperationsvertrages ebenso wie die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen anonymisiert dargestellt.

Das Forschungsprojekt AZ 27092-21/0 wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.



## 2. Einleitung

Staub ist ein natürlicher Bestandteil der Luft und somit überall vorhanden. Feinstaub in der Außenluft ist jedoch ab einer bestimmten Konzentration als Luftschadstoff einzustufen. Die gesundheitliche Relevanz wird sowohl durch die Größe (Kleinheit) der Partikel als auch durch die chemischen Bestandteile begründet. Humanmedizinisch relevant sind Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  (PM10).

Mit der Novellierung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 2002 wurden in Deutschland die Vorgaben der Europäischen Union bezüglich Feinstaubimmissionen umgesetzt. Seit Januar 2005 gilt in der Bundesrepublik ein Jahresmittelwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ein Tagesmittelwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , der an nicht mehr als 35 Tagen im Jahr überschritten werden darf [BMU02].

Die durchschnittliche jährliche Feinstaubbelastung ist in den letzten Jahren leicht zurückgegangen, unterliegt aber starken zwischenjährlichen Schwankungen, die vor allem auf unterschiedliche Witterungseinflüsse zurück zu führen sind [UBA09]. Die geltenden Grenzwerte können trotz vielfältiger Maßnahmen nicht immer und überall eingehalten werden, dies gilt insbesondere für die zulässige Überschreitungshäufigkeit des Tagesmittelwertes. Die geplante Verschärfung der Grenzwerte im Jahr 2010 wurde durch die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes aufgehoben, dadurch haben die alten Grenzwerte vorerst weiterhin Gültigkeit [Blm10, BMU02].

Feinstaubemissionen entstehen auf vielerlei Weise, sowohl natürlich als auch anthropogen. Die Zuordnung zu konkreten Quellen mit Hilfe von Immissionsmessungen wird unter anderem durch die niedrige Sinkgeschwindigkeit und dem daraus resultierenden möglichen Ferntransport der Partikel erschwert.

Über Tagebaue der Steine- und Erdenindustrie, die als potentielle Feinstaubemittenten anzusehen sind, liegen diesbezüglich bislang kaum Untersuchungen vor. Werden Feinstaubkonzentrationen gemessen, geschieht dies in der Regel in der Umgebung der Betriebe. Die Werte gehen demnach auf Immissionsmessungen zurück, die nicht zwingend eine Aussage über die Herkunft des Staubes erlauben.

Maßnahmen zur Emissionsminderung haben für die überwiegend mittelständischen Gewinnungsbetriebe planerische, technische und ökonomische Konsequenzen. Das Verhältnis von Aufwand und Nutzen ist daher abzuwägen. Die Beurteilung leidet bisher darunter, dass die gängigen Maßnahmen in erster Linie für die Bekämpfung des Grobstaubes konzipiert wurden.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es, die signifikanten Feinstaubquellen im Tagebau zu identifizieren und ihr Emissionspotential zu quantifizieren. Darüber hinaus sollte die Bedeutung der Quellen für das Umfeld, unter Berücksichtigung der Einflüsse von Emission – Transmission – Immission, bestimmt werden. Wesentliche Schritte der

Untersuchungen sind im nachstehenden Schema (Abbildung 1) dargestellt.

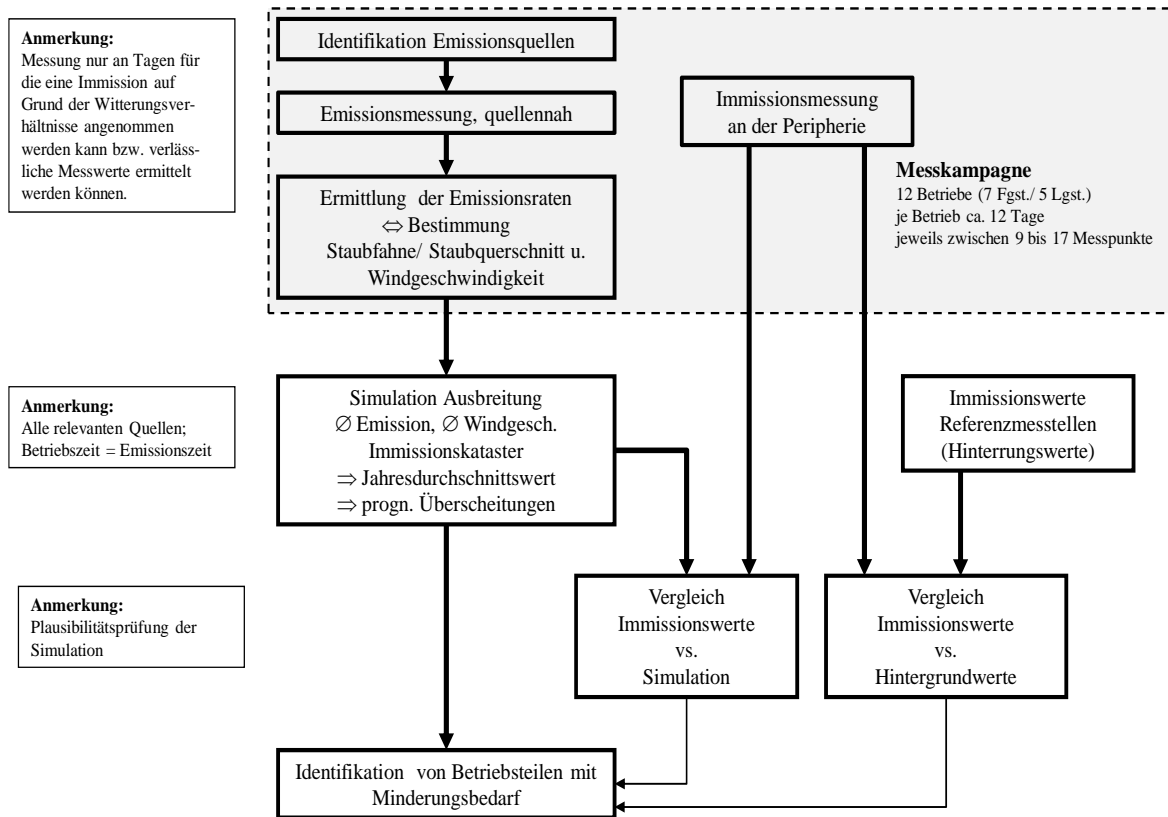


Abbildung 1: Schema der Untersuchungsschritte

Die Aufgabenstellung umfasste zunächst Emissionsmessungen innerhalb der Tagebaue an Betriebsanlagen der Aufbereitung. Darüber hinaus wurde die Feinstaubemission durch Fahrwege sowie durch Ladevorgänge des Rohmaterials durch Radlader auf Schwerlastkraftwagen quantifiziert. Bei den insgesamt zwölf Untersuchungsbetrieben handelte es sich um sieben Festgesteins- und fünf Lockergesteinstagebaue.

Auf Basis der Emissionsmessungen an signifikanten Feinstaubquellen konnte deren durchschnittliche Emissionsrate ermittelt werden. Die Messergebnisse werden im Folgenden dargelegt und einer Bewertung unterzogen. Hier werden insbesondere Unterschiede des Emissionspotentials von Locker- und Festgesteinstagebauen sowie auf den Einsatz emissionsmindernder Maßnahmen zurück zu führende Unterschiede herausgestellt.

Die von Tagebauen ausgehenden Emissionen stellen keine geführten Quellen dar, die Ermittlung des nicht gefassten Volumenstromes ist daher mit Unsicherheiten verbunden. Zur Ermittlung der Emissionsraten wurde hier an jedem Messpunkt die Durchgangsfläche der Staubfahne mit Hilfe der mobilen Staubmessgeräte ermittelt sowie die Strömungsgeschwindigkeit (Windstärke) aufgenommen.

Die Daten der Emissionsmessungen dienen im weiteren Projektverlauf der Durchführung von Ausbreitungsrechnungen. Auf diese Weise konnten individuelle Immissionskataster für alle Tagebaue abgebildet werden. Ferner bieten Ausbreitungsrechnungen die Möglichkeit, die Wirkung einflussnehmender Parameter, wie die meteorologischen Verhältnisse und die Topographie und die damit verbundenen Immissionsverhältnisse zu untersuchen.

Die Auswirkungen von Luftschadstoffen als Einwirkung auf den Menschen und die Natur werden durch die Immission beschrieben. Messungen dazu erfolgten an der Peripherie des Betriebsgeländes bzw. am Tagebaurand oder in deren unmittelbarer Umgebung. Sie repräsentieren die tatsächlich vorliegende Feinstaubbelastung während des Messzeitraums und können gleichzeitig zur Plausibilitätsprüfung der Ausbreitungsrechnungen herangezogen werden.

Die Ausbreitung der Schadstoffe und ihre Deposition sind stark von den meteorologischen Bedingungen, d.h. von Windgeschwindigkeit, -richtung und Turbulenz, abhängig. Es ist daher notwendig, den Transport der Schadstoffe in die Atmosphäre und die dabei auftretende Durchmischung und Verdünnung, sowie deren chemische Reaktionen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen sind Immissionskataster der Betriebe und ihres Umfeldes und können zur Beurteilung der durch die Betriebe generierten Zusatzbelastung herangezogen werden.

Mit Hilfe der Ausbreitungsrechnungen wurde anhand von Szenarien untersucht, in wie weit sich meteorologische und topographische Verhältnisse auf die Konzentration und das Ausbreitungsverhalten des Staubes auswirken.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen von Minderungseffekten von Schutzmaßnahmen durchgeführt. Da die Beurteilung von Grünstreifen aufgrund der kurzen Messzeiträume nicht hinreichend gesichert ist, stützen sich die Aussagen dazu auf die einschlägige Literatur.

Um die Feinstaubbelastung eines Betriebes generell einschätzen zu können, wurde eine Typisierung der untersuchten Tagebaue vorgenommen. Dabei wurden die betrieblichen Verhältnisse generalisiert. Ein auf die Typisierung bezogener Maßnahmenkatalog soll anderen Betrieben bei der Einschätzung ihrer Handlungsmöglichkeiten dienen. Dabei werden "als erforderlich erachtete" und "gegebenenfalls zu prüfende" zusätzliche Staubschutzmaßnahmen unterschieden.

Für eine Beurteilung, in welchem Maße einzelne Materialien Staub emittieren, wurden Proben aus den Tagebauen im Labor untersucht. Dabei wurde die freigesetzte Menge von einatembarem und alveolengängigem Staub quantifiziert. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den gemessenen Feinstaubwerten liefert eine Indikation zu den Ursachen hoher Emissionswerte im Einzelfall.

### 3. Methodik und Ergebnisse

#### 3.1 Messkampagnen in den Untersuchungsbetrieben

An den Untersuchungen nahmen sieben Gewinnungsbetriebe aus dem Festgestein und fünf aus dem Lockergestein teil. Aus Datenschutzgründen werden ihnen die Bezeichnungen RWTH-1 bis RWTH-12 gegeben. Die Betriebe weisen deutliche Unterschiede in Bezug auf ihre Gewinnungsfläche und Produktionsleistung auf (Tabelle 1).

Mit Messkampagnen wurden sowohl die Emissionen an potentiellen Feinstaubquellen im Tagebau als auch die Immissionen am Tagebaurand ermittelt. Die untersuchten Lockergesteinsbetriebe fördern Kies und Sand im Trockenabbau, ein Betrieb im Nassabbau. Die Festgesteinstagebaue produzieren überwiegend Schotter und Splitte aus Kalkstein, Diabas, Basalt und Grauwacke.

In Tabelle 1 sind die Eckdaten der Untersuchungsbetriebe sowie die Anzahl der Messpunkte aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der Untersuchungsbetriebe

Bezeichnung	Kategorie	Produkte	Fläche	Förderung	Messpunkte	
					Emission	Immission
RWTH-1	Lockergestein	Kies und Sand	265.000 m <sup>2</sup>	600.000 t/a	7	8
RWTH-2	Lockergestein	Kies und Sand	567.000 m <sup>2</sup>	600.000 t/a	6	9
RWTH-3	Festgestein	Schotter, Splitte (Diabas)	468.000 m <sup>2</sup>	600.000 t/a	8	6
RWTH-4	Festgestein	Schotter, Splitte (Basalt)	240.000 m <sup>2</sup>	200.000 t/a	7	4
RWTH-5	Festgestein	Schotter, Splitte (Basalt)	600.000 m <sup>2</sup>	1.000.000 t/a	9	5
RWTH-6	Lockergestein	Kies und Sand	181.000 m <sup>2</sup>	120.000 t/a	5	7
RWTH-7	Lockergestein	Kies und Sand	200.000 m <sup>2</sup>	120.000 t/a	3	5
RWTH-8	Lockergestein	Kies und Sand	271.000 m <sup>2</sup>	300.000 t/a	11	4
RWTH-9	Festgestein	Schotter und Splitte (Kalk, Dolomit)	123.000 m <sup>2</sup>	200.000 t/a	8	5
RWTH-10	Festgestein	Fein-, Stück- und Löschkalk	142.000 m <sup>2</sup>	200.000 t/a	13	5
RWTH-11	Festgestein	Schotter, Splitte (Grauwacke)	97.000 m <sup>2</sup>	150.000 t/a	7	4
RWTH-12	Festgestein	Schotter, Splitte (Kalkstein)	95.000 m <sup>2</sup>	20.000 t/a	6	7

Die Quellstärken der Anlagen wurden mit mobilen Feinstaubmessgeräten ermittelt. Hierzu konnten zu Beginn vier, im späteren Projektverlauf drei Grimm Aerosol-Spektrometer der Typen 1.108 und 1.107 eingesetzt werden. Die Geräte erfassten die Massenkonzentrationen von PM10 im Messintervall von sechs Sekunden und einem Speicherintervall von einer Minute. Mit dieser hohen Auflösung wurde gewährleistet, dass auch kurzzeitige Ereignisse, wie beispielsweise das Verkippen von Material oder das Beschicken eines Brechers, sichtbar wurden.

Aus den gemessenen Feinstaubkonzentrationen wurden die Emissionsraten berechnet. Anders als beispielsweise bei einem Kamin, der eine geführte Quelle darstellt, bei dem die Ermittlung der Austrittsmenge und -geschwindigkeit des Abgases eindeutig ermittelt werden kann, müssen die Emissionsraten an den nicht geführten Quellen im

Tagebau ortsbezogen individuell berechnet werden. Hierzu wurde im Nahbereich einer Quelle, z.B. einem Brecher, mit Hilfe der mobilen Feinstaubmessgeräte die Durchgangsfläche der Staubfahne bestimmt. Diese wurde mit der an diesem Punkt herrschenden Windgeschwindigkeit, die gleichzeitig der Austrittsgeschwindigkeit entspricht, multipliziert. Für die Berechnung der Emissionsraten wurde stets sowohl die mittlere Windgeschwindigkeit als auch die mittlere Feinstaubkonzentration der Messtage verwendet.

Unter Berücksichtigung der Unterschiede der Quellen und der Materialzustände stellt diese Methode nach Ansicht der Bearbeiter eine weitaus genauere Abbildung der realen Verhältnisse dar, als der für Schüttungen ausgelegte Ansatz nach VDI-Richtlinie 3790 Blatt 3. Diese Richtlinie stützt sich auf theoretische Berechnungen mittels der Durchflussrate und Schüttdichte des Materials, ihrer Staubungsneigung und weiterer Parameter [VDI99]. Für die in diesem Projekt untersuchten Feinstaubquellen ist dieses Verfahren jedoch zu unspezifisch. Das Material durchläuft in den Tagebauanlagen zahlreiche Aufbereitungsschritte, bei denen es jeweils in anderer Stück- bzw. Korngröße auftritt. Die Staubungskenngrößen liegen jedoch nur allgemein für einen Zustand vor. Ferner wurden die VDI Berechnungen für die Aufnahme oder den Abwurf von Material entwickelt. Eine mechanische Beanspruchung und eine damit einhergehende Änderung des Staubungsverhaltens werden nicht berücksichtigt [VDI99]. Aus diesen Gründen wurde hier der oben dargestellte Ansatz gewählt.

Eine Übersicht der ermittelten Emissionsraten für die untersuchten Emissionsmesspunkte bzw.-quellen befindet sich in Anhang II. Sie stellt die während der gesamten Messkampagne durchschnittlich ermittelte Feinstaubmenge der untersuchten Quellen in Gramm pro Sekunde dar. Eine Auflistung aller Messungen mit Angabe der Feinstaubkonzentration befindet sich in Anhang I.

Die Messungen an den Kontrollpunkt erfolgte grundsätzlich über ganze Betriebstage (8-10 Stunden), die Anzahl der Messtage variierte. Nach Arbeitsplan waren für jeden Betrieb zwei Wochen für die Emissionsmessungen vorgesehen, was bei der Anzahl möglicher Feinstaubemittenten die Datenmenge je Messpunkt einschränkt. Dennoch war es möglich, die Messhäufigkeit und damit die Datendichte für einige Betriebe zu erhöhen.

Alle Messungen wurden dokumentiert. Neben den Angaben zum Betrieb und der Messpunktnummer wurden die GPS-Koordinaten, die Gerätenummer des jeweiligen Feinstaubmessgerätes sowie das Datum und die Uhrzeit protokolliert. Weitere wesentliche Bestandteile des Protokolls waren die spezifischen Angaben zu den meteorologischen Verhältnissen am Messpunkt (Windstärke und -richtung, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur), die mehrmals pro Untersuchungstag mit einem mobilen Klimamessgerät ermittelt wurden. Zusätzliche notwendige Informationen waren solche über die Aufbereitungsanlage sowie betriebliche Aspekte, wie Stillstandzeiten oder die Anwendung von Maßnahmen zur Staubreduzierung.

Die geplanten Messintervalle wurden, wenn nötig, der Witterung gemäß angepasst. Da die Geräte z.B. bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % rH oder höher sowie bei Niederschlägen keine gesicherten Werte liefern, mussten Messkampagnen entsprechend auf trockene Tage verschoben werden. Die gewonnenen Messergebnisse fallen daher tendenziell höher aus, als tatsächlich im Durchschnitt zu erwarten ist, da eine Emissionsminderung während und unmittelbar nach Niederschlägen nicht aufgezeichnet werden konnte. Darüber hinaus sind die Ergebnisse aufgrund der relativ kurzen Messdauer als Stichproben anzusehen, so dass nicht vollständig auszuschließen ist, dass „Ausreißer“ die Aussagekraft beeinflusst haben.

Mitunter ließen sich Messungen an vom Emissionsgeschehen her sinnvollen Standorten nicht realisieren, weil das Aufstellen der Geräte nicht praktikabel war. Dies gilt insbesondere für Messungen an Aggregaten, die räumlich untereinander angeordnet sind, bei der das Messgerät also auf der Anlage zu platzieren war. Die von diesen Anlagen ausgehende Vibration war mitunter so stark, dass eine Beschädigung der Messgeräte zu befürchten war. Solche Messpunkte mussten folglich ausgeschlossen werden. Durch die eingeschränkten Standortmöglichkeiten ließen sich die Messungen nicht systematisch in allen Betrieben an gleichen bzw. gleichartigen Aggregaten bzw. Emittenten durchführen.

Ein weiterer limitierender Faktor bei der Auswahl und der Anzahl der Messpunkte war letztlich die zur Verfügung stehende Zeit für die Messkampagnen und die Anzahl der Untersuchungsbetriebe. Es war nicht möglich, in allen Tagebauen über mehrere Tage Messungen an sämtlichen potentiellen Feinstaubquellen durchzuführen. Die einzelnen Kampagnen wurden daher jeweils auf solche Anlagen beschränkt, die durch Kurzzeitmessungen eindeutig als Hauptemittenten identifiziert worden waren.

Ergänzend zu den Betriebsmessungen wurden im Nahbereich der Tagebaue Immissionsmessungen durchgeführt. Aufgrund der topographischen Verhältnisse von Gewinnungsbetrieben, hier insbesondere ihrer Ausdehnung in die Tiefe, war zu erwarten, dass sich der entstehende Feinstaub nicht ungehindert in die Umgebung ausbreiten kann. Inwieweit dies zutrifft, wurde anhand der Messungen überprüft.

Überwiegend erfolgten Emissions- und Immissionsmessungen zeitgleich. Ansonsten fanden die Immissionsmessungen ebenfalls während des gesamten Betriebszeitraumes und unter möglichst ähnlichen meteorologischen Bedingungen wie die Emissionsmessungen statt. Die dabei gemessenen Werte stellen den Ist-Zustand der Gesamtbelastung dar, für eine Einschätzung der vom Tagebau ausgehenden Immissionen wurden Daten von Messstationen der Landesumweltämter hinzugezogen. Aus der Differenz der Hintergrundbelastung und der am Tagebaurand gemessenen Immissionen ließ sich die Zusatzbelastung durch die Betriebe berechnen.

Folgend werden die Ergebnisse der Messkampagnen dargestellt.

Der Betrieb **RWTH-1** ist ein Lockergesteinstagebau, in dem Kies und Sand in Nassabgrabung gewonnen wird. Die jährliche Produktionsleistung liegt bei rund 600.000 t/a bei einer Betriebsfläche von 265.000 m<sup>2</sup>. Es sind komplexe Aufbereitungsanlagen vorhanden. Emissionsmesspunkte waren hier die Schwertwäsche, Siebanlagen, Brecher, Übergabestellen, die Verladung sowie Fahrwege. Insgesamt gab es hier fünfzehn Messpunkte, von denen an sieben die Emissionen und an acht die Immissionen aufgenommen wurden.

Als stärkster Feinstaubemittent stellt sich die Aufgabe zur Schwertwäsche heraus. Die Schüttung des noch ungewaschenen Materials führt zu den höchsten Feinstaubkonzentrationen in diesem Betrieb von 533 µg/m<sup>3</sup>. Die Brecheranlage zeigt ähnlich hohe Emissionen. Auch Fahrwege sowie die Verladung stellen starke Feinstaubemittenten dar. Die Nasssiebung verursacht mit 35 µg/m<sup>3</sup> die geringsten Emissionen. Abbildung 2 gibt die Anteile der Emittenten an den durchschnittlichen Feinstaubemissionen wieder.

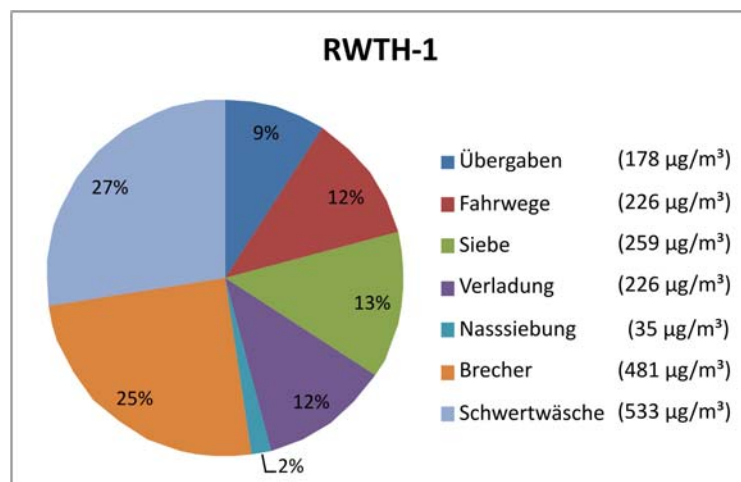


Abbildung 2: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-1

Bei Tagebau **RWTH-2** handelt es sich ebenfalls um einen Lockergesteinstagebau, in dem Kies und Sand in der Trockenabgrabung gewonnen wird. Die jährliche Förderleistung des Betriebes beträgt rund 600.000 t/a auf einer Betriebsfläche von 567.000 m<sup>2</sup>. Gemessen wurde an sechs Emissions- und neun Immissionspunkten. Wie bei Tagebau RWTH-1 umfassen die Emissionsmesspunkte Übergaben, Fahrwege, Siebe sowie die Verladung. Zusätzlich wird in diesem Tagebau bei Bedarf ein mobiler Brecher angemietet. Dies ist jedoch nur selten notwendig und war während der Messperiode nicht der Fall. Die Anteile der Emissionsgruppen in diesem Betrieb haben eine recht gleichmäßige Verteilung, wie Abbildung 3 veranschaulicht.

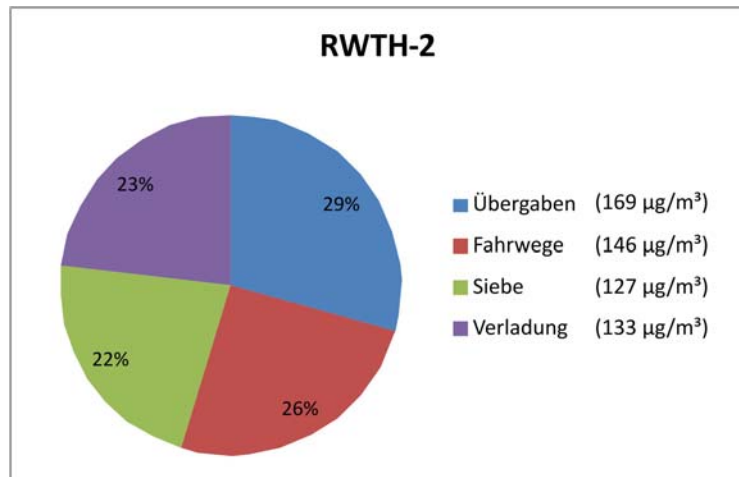


Abbildung 3: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-2

Übergaben stellen sich in diesem Fall als stärkste Emittentengruppe heraus, im Durchschnitt beträgt die hier gemessene Feinstaubkonzentration  $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Feinstaubkonzentration der schwächsten Emittentengruppe beträgt durchschnittlich  $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Der Tagebau **RWTH-3** ist ein Festgesteinstagebau, in dem aus Diabas in erster Linie Schotter und Splitte produziert werden. Die jährliche Förderleistung beträgt ca. 600.000 t/a bei einer Betriebsfläche von 468.000 m<sup>2</sup>. Der Diabas wird klassisch mittels Bohren und Sprengen aus dem Gebirgsverband gelöst, das Haufwerk wird von einem Hydraulikbagger aufgenommen und von Schwerlastkraftwagen zum Brecher transportiert. Das Material wird mehrfach zerkleinert, klassiert und in Silos oder auf Halden gelagert. Die Anlagen sind in diesem Betrieb so komplex gebaut, dass nicht an jedem potentiellen Emittenten Messungen durchgeführt werden konnten. Insgesamt wurden acht Emissions- und sechs Immissionsmesspunkte ausgewählt.

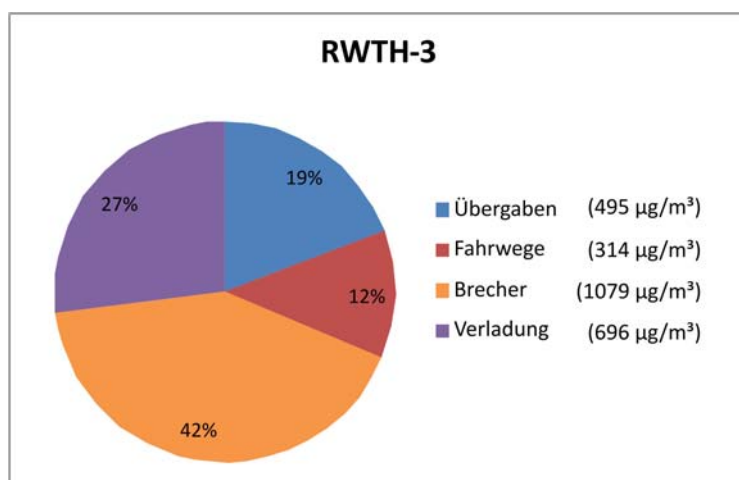


Abbildung 4: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-3



Die mit Abstand höchsten Emissionen wurden durch die Brecher verursacht. Die durchschnittlich ermittelte Feinstaubkonzentration beträgt hier  $1.079 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . An dieser Stelle kann bereits gesagt werden, dass dies die geringsten Konzentrationen sind, die an einem Brecher im Festgestein im Rahmen dieser Untersuchungen gemessen wurden. Wie auch in den anderen Untersuchungstagebauen stellen Übergaben, Verladestellen und Fahrwege die weiteren Hauptemittenten dar. Die geringsten Feinstaubkonzentrationen werden hier an Fahrwegen verursacht, jedoch betragen sie im Durchschnitt immerhin noch  $314 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Bei Tagebau **RWTH-4** handelt es sich um einen Basaltsteinbruch mit einer Förderleistung von 240.000 t/a. Die Produktion schwankt sehr stark, die Angabe bezieht sich daher auf die mittlere Produktionsleistung. Es werden überwiegend Schotter und Splitte produziert. Die Tagebaufläche beträgt ca. 200.000  $\text{m}^2$ .

Insgesamt wurden sieben Emissions- und vier Immissionsmesspunkte bestimmt. In diesem Betrieb treten deutlich höhere Emissionen auf, als in den anderen Untersuchungstagebauen. An Übergaben herrscht hier, trotz teilweise vorhandener Einhausung der Bandanlagen, eine extrem hohe Feinstaubbelastung von  $16.943 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Weitere Feinstaubemittenten sind Siebe, Brecher und die Verladung. Während des Ladevorgangs des Rohmaterials durch Radlader auf SKW wurden im Schnitt  $606,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen, an Fahrwegen waren mit  $281 \mu\text{g}/\text{m}^3$  die geringsten Konzentrationen festzustellen. Das Verhältnis der Emittentengruppen untereinander ist in Abbildung 5 dargestellt, hier ist gut zu erkennen, wie deutlich Übergaben als Feinstaubquelle hervortreten.

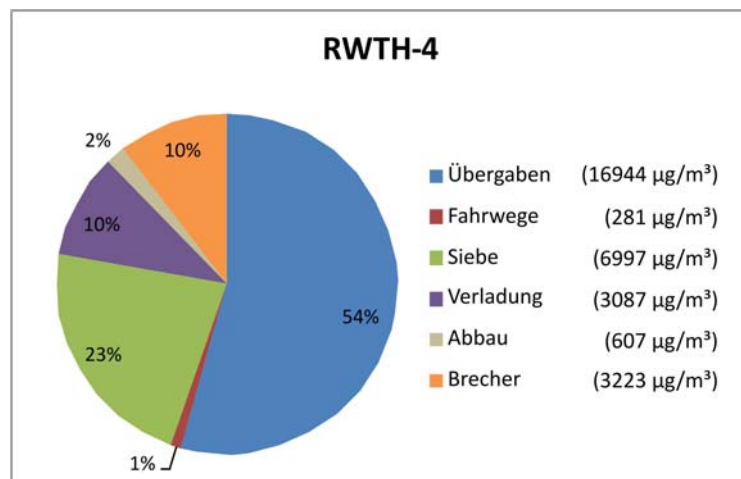


Abbildung 5: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-4

Bei Tagebau **RWTH-5** handelt sich ebenfalls um einen Basaltsteinbruch, der überwiegend Schotter und Splitte produziert. In diesem Tagebau beträgt die jährliche Förderleistung rund 1.000.000 t/a bei einer Betriebsfläche von etwa 600.000  $\text{m}^2$ . Emissionen wurden an neun Punkten, Immissionen an fünf Punkten gemessen.

Übergabestellen sind hier als Hauptemittenten identifiziert worden. Die durchschnittliche Feinstaubkonzentration beträgt  $2.650 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Auch die Feinstaubkonzentrationen von Brechern sind, trotz Schutzmaßnahmen, mit  $2.288 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sehr hoch. Die drittgrößte Emittentengruppe sind Verladestellen, die schwächste sind die Fahrwege, an diesen wurden durchschnittlich  $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$  registriert.

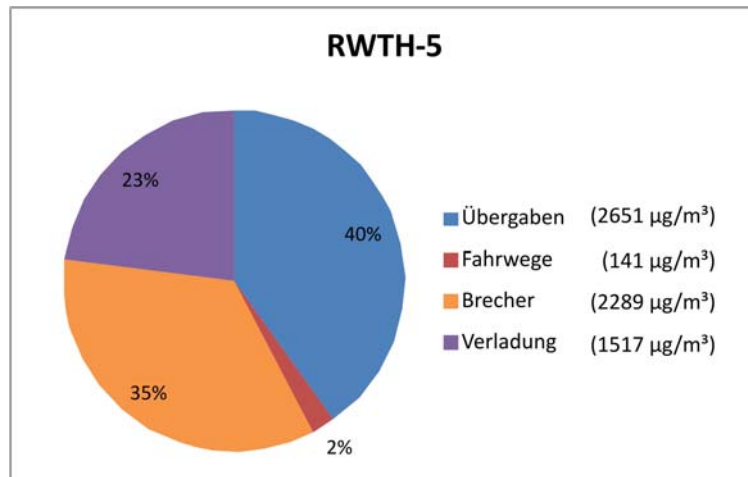


Abbildung 6: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-5

Der Tagebau **RWTH-6** ist ein Lockergesteinstagebau, in dem Kiese und Sande mit einer durchschnittlichen Produktionsleistung von 120.000 t/a abgebaut und veredelt werden. Die Betriebsfläche beträgt 181.000 m<sup>2</sup>. Die Messungen fanden an fünf Emissions- und sieben Immissionspunkten statt.

Der Abbau erfolgt mittels Radlader, der das Material abgräbt und es im „Load and Carry-Betrieb“ zur mobilen Siebanlage transportiert. Als Hauptemittenten konnten die Siebanlage und die Fahrwege ermittelt werden, wobei Fahrwege die höchsten Feinstaubemissionen aufweisen. Daher ist es sinnvoll, diese differenziert zu betrachten. Zum einen gibt es die Fahrstrecke, die der Radlader von der Gewinnungsstelle zur Siebanlage zurücklegt und zum anderen die LKW-Fahrstrecke durch die Grube. An der LKW-Fahrstrecke kommt es mit  $711 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu deutlich höheren Emissionen als an der Fahrstrecke des Radladers, wo im Durchschnitt  $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen wurden. Die Ursache hierfür wird in Kapitel 3.2 erläutert.

Die Feinstaubkonzentrationen an der Siebanlage liegen im Mittel bei  $251 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die geringsten Feinstaubkonzentrationen entstehen während des Abbaus (Abgraben des Rohmaterials), hier liegen sie bei  $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , was auf die Bergfeuchte des anstehenden Materials zurückgeführt werden kann. In Abbildung 7 ist das Verhältnis der Emittentengruppen dargestellt.

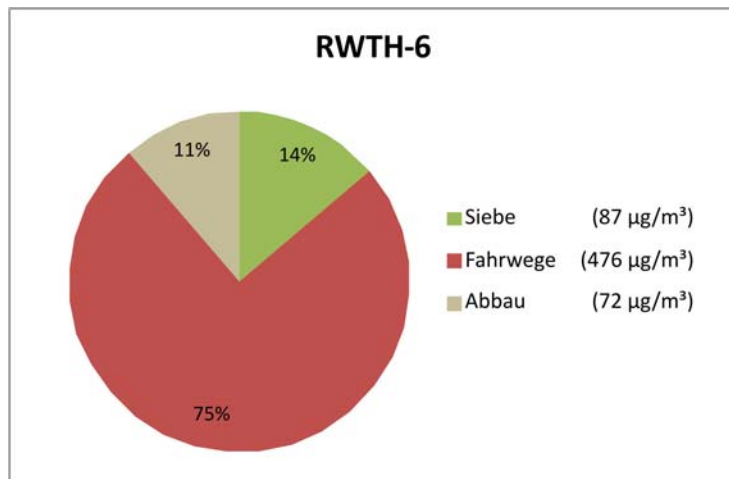


Abbildung 7: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-6

Bei Tagebau **RWTH-7** handelt sich ebenfalls um einen Lockergesteinstagebau, in dem Kies und Sand gewonnen wird. Die jährliche Produktionsleistung liegt bei etwa 120.000 t/a bei einer Betriebsfläche von 200.000 m<sup>2</sup>. In diesem Betrieb wurde die Feinstaubkonzentration an acht Messpunkten aufgenommen, an fünf dieser Messpunkte erfolgten Immissionsmessungen.

Auch hier werden Kiese und Sande mittels Radlader abgegraben und zu einer mobilen Siebanlage transportiert. Aufgrund der besonders einfach gehaltenen Betriebsführung mit wenigen Aufbereitungsanlagen, weist dieser Betrieb lediglich die Siebmaschine und die Fahrwege als Feinstaubquellen auf. Letztere haben sich als Hauptemittent herausgestellt. Besonders hoch ist die Feinstaubbelastung an einem Fahrweg dann, wenn unbeladene LKW in die Grube hineinfahren um dort beladen zu werden. An den positionierten Messgeräten ist eine Feinstaubbelastung von durchschnittlich 818 µg/m<sup>3</sup> festzustellen. Die durch den Radlader verursachten Emissionen sind mit 117 µg/m<sup>3</sup> deutlich geringer. Die Siebanlage verursacht im Durchschnitt eine Feinstaubkonzentration von 576 µg/m<sup>3</sup>.

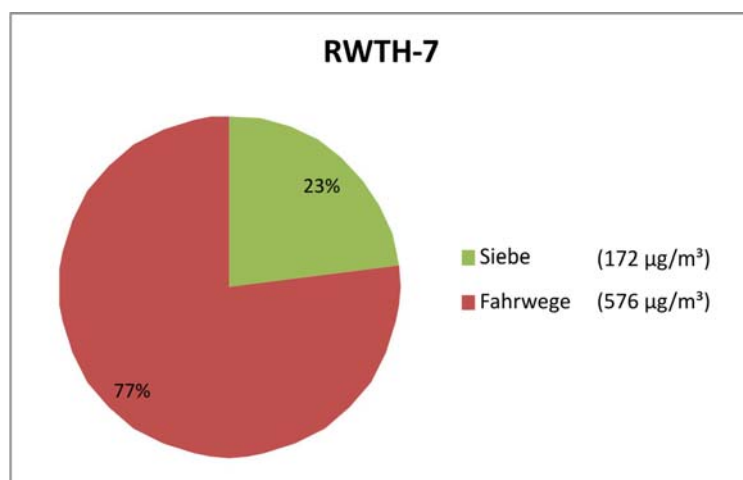


Abbildung 8: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-7

Im Lockergesteinstagebau **RWTH-8** wird Kies und Sand mit einer Produktionsleistung von rund 300.000 t/a gewonnen. Die Betriebsfläche beträgt 271.000 m<sup>2</sup>. Der Betrieb verfügt über umfangreiche Aufbereitungsanlagen. Es wurden elf Emissionsmesspunkte sowie vier Immissionsmesspunkte ausgewählt. Stärkste Feinstaubemittenten sind die Übergaben, hier herrscht eine mittlere Feinstaubkonzentration von 622 µg/m<sup>3</sup>. Es folgen Brecher, Fahrwege, Siebe und die Schwertwäsche. Mit 161 µg/m<sup>3</sup> ist hier die geringste Feinstaubkonzentration festzustellen. Insgesamt ergibt sich das in Abbildung 9 dargestellte Verhältnis der Emittentengruppen.

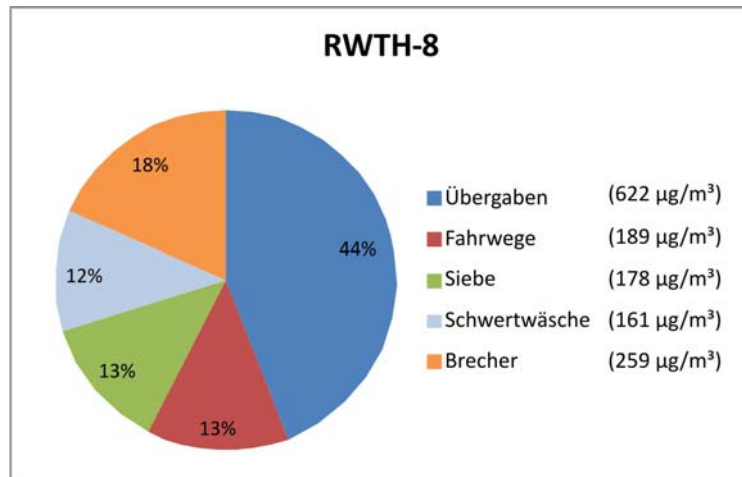


Abbildung 9: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-8

Festgesteinstagebau **RWTH-9** ist ein Kalk- und Dolomitsteinbruch. Hier werden rund 200.000 Tonnen Schotter und Splitte jährlich produziert. Die Tagebaufläche beträgt 123.000 m<sup>2</sup>. Das Gestein wird durch Bohren und Sprengen aus dem Gebirgsverband gelöst und anschließend mittels Hydraulikbagger-SKW-Betrieb zur Aufbereitung befördert. Die Anlagen sind mobil bzw. semi-mobil. Überprüft wurden acht Emissions- und fünf Immissionsmesspunkte.

Die höchsten Feinstaubkonzentrationen entstehen am Brecher, hier betragen sie im Mittel 2.604 µg/m<sup>3</sup>. Es folgen Übergaben und Siebe. An Fahrwegen herrscht eine durchschnittliche Feinstaubkonzentration von 286 µg/m<sup>3</sup>.

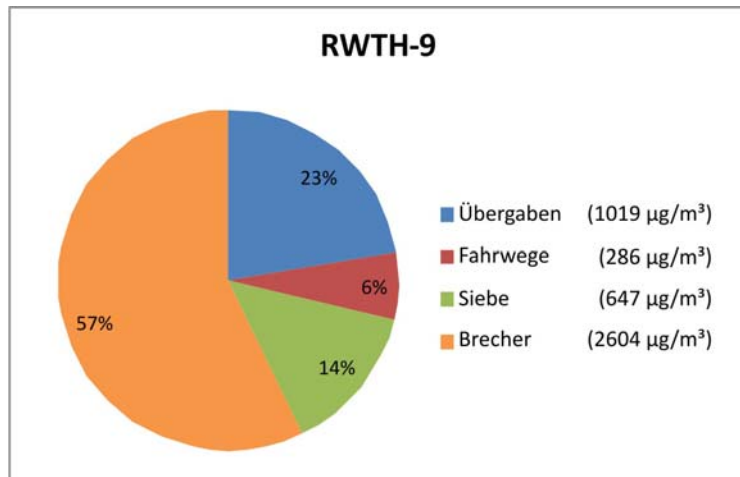


Abbildung 10: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-9

Der Tagebau **RWTH-10** ist ein Kalksteinbruch, der überwiegend Fein-, Stück- und Löschkalk produziert. Die jährliche Produktionsleistung liegt bei etwa 200.000 Tonnen. Die Betriebsfläche beträgt 142.000 m<sup>2</sup>. Hier wurden an dreizehn Punkten Emissionen sowie an fünf Punkten Immissionen gemessen. Die Feinstaubkonzentration ist mit 5.167  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  am Brecher am höchsten. Weitere Emittenten sind Siebe, Verladestellen und Übergaben. Der Abbau repräsentiert das Ladespiel, d.h. die Aufnahme von Rohhaufwerk mit dem Radlader und die Übergabe an einen SKW, hier treten im Mittel Feinstaubkonzentrationen von 412  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  auf. An Fahrwegen sind es 351  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

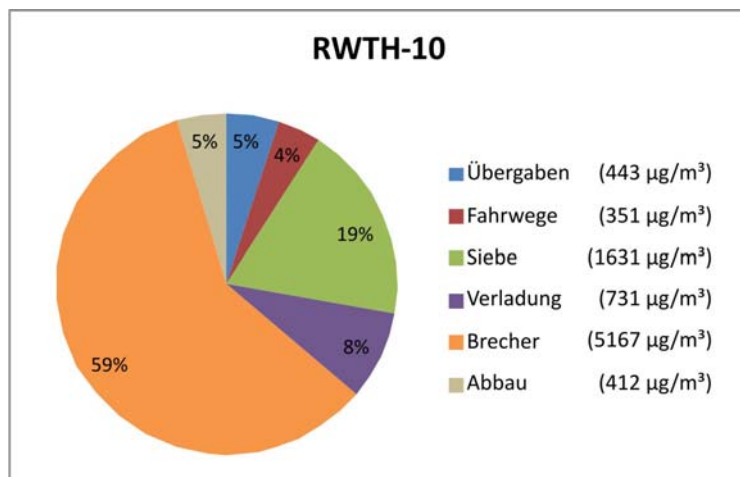


Abbildung 11: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-10

**RWTH-11** ist ein Grauwackesteinbruch, der Schotter und Splitte produziert. Die jährliche Tonnage liegt bei etwa 150.000 Tonnen. Die Betriebsfläche beträgt 97.000 m<sup>2</sup>. Die Messungen fanden an sieben Emissions- und vier Immissionspunkten statt. Die mit Abstand höchsten Feinstaubkonzentrationen werden auch hier von den Brechern verursacht. Mit durchschnittlich 8.039  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  werden in diesem Betrieb die höchsten Konzentrationen im Vergleich zu den anderen Tagebauen verzeichnet. Weitere Emittenten stellen Übergaben, die Radlader-SKW-Verladung sowie die Fahrwege dar.

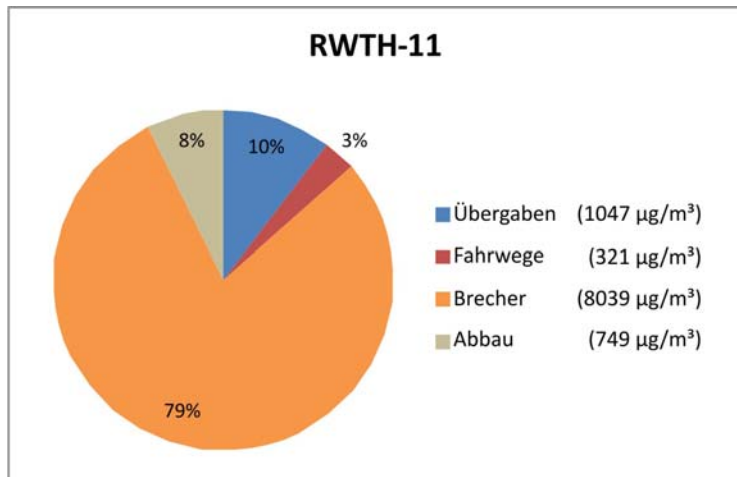


Abbildung 12: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-11

Auch Tagebau **RWTH-12** ist ein Kalksteinbruch. Produziert werden Schotter und Splitte mit einer Produktionsleistung von 20.000 t/a, die Betriebsfläche beträgt 95.000 m<sup>2</sup>. Die Messungen wurden hier an sechs Emissions- und sieben Immissionspunkten durchgeführt.

In diesem Betrieb war es möglich, die Feinstaubkonzentrationen während Sprenglochbohrungen zu messen. Durch die Bohrungen treten durchschnittliche Feinstaubkonzentrationen von 9.981  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  auf. Aufgrund der geringen Produktion wird in diesem Betrieb jedoch nur alle vier bis sechs Wochen gesprengt, infolge dessen ist dies hier nicht die Haupt-Emissionsquelle. Als solche stellt sich die Siebanlage heraus mit einer durchschnittlichen Feinstaubkonzentration von 5.890  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Darauf folgen Brecher, die Radlader-SKW-Verladung sowie Fahrwege mit durchschnittlich 128  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

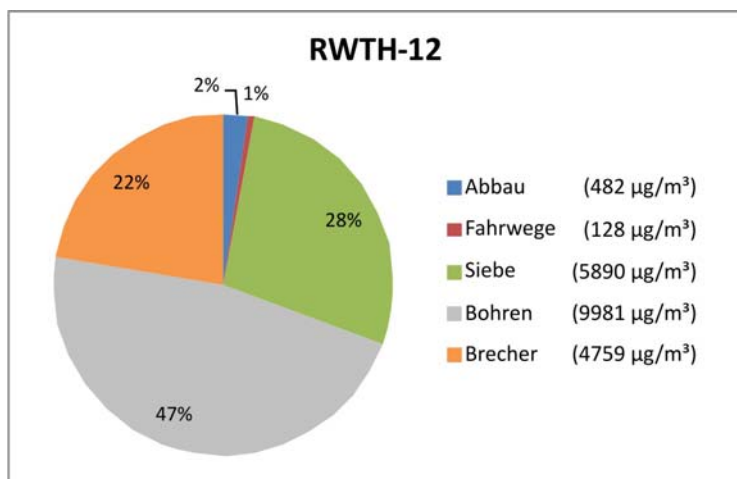


Abbildung 13: Anteile der Emittentengruppen im Tagebau RWTH-12

## 3.2 Bewertung der Feinstaubquellen und Minderungsmaßnahmen

Insgesamt ist das Emissionspotential von Festgesteinstagebauen deutlich höher als das von Lockergesteinstagebauen. Im Folgenden sollen die Emittenten der Tagebaue vergleichend gegenübergestellt werden.

Die Emittenten werden hier zur besseren Veranschaulichung erneut als Gruppen zusammengefasst, da stets an mehreren Sieben, Übergaben etc. Messungen durchgeführt wurden. In den Ausbreitungsrechnungen werden die Emittenten jedoch einzeln behandelt, da sie örtlich voneinander getrennte Einzelquellen darstellen. Abbildung 14 gibt eine Übersicht über die Anteile der Emittentengruppen in den einzelnen Betrieben sowie der Betriebe untereinander. Die Werte auf der Y-Achse stellen die gemessenen Feinstaubkonzentrationen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  am Messpunkt dar. Deutlich treten hier die Festgesteinstagebaue als Feinstaubemittenten hervor (RWTH-3, -4, -5, -9, -10, -11 und -12). Die höchste Feinstaubbelastung geht vom Festgesteinstagebau RWTH-4 aus, die geringste von Tagebau RWTH-3. Verglichen mit den Emissionen in Lockergesteinstagebauen sind die Emissionen der Festgesteinstagebaue um mehr als 90 % höher.

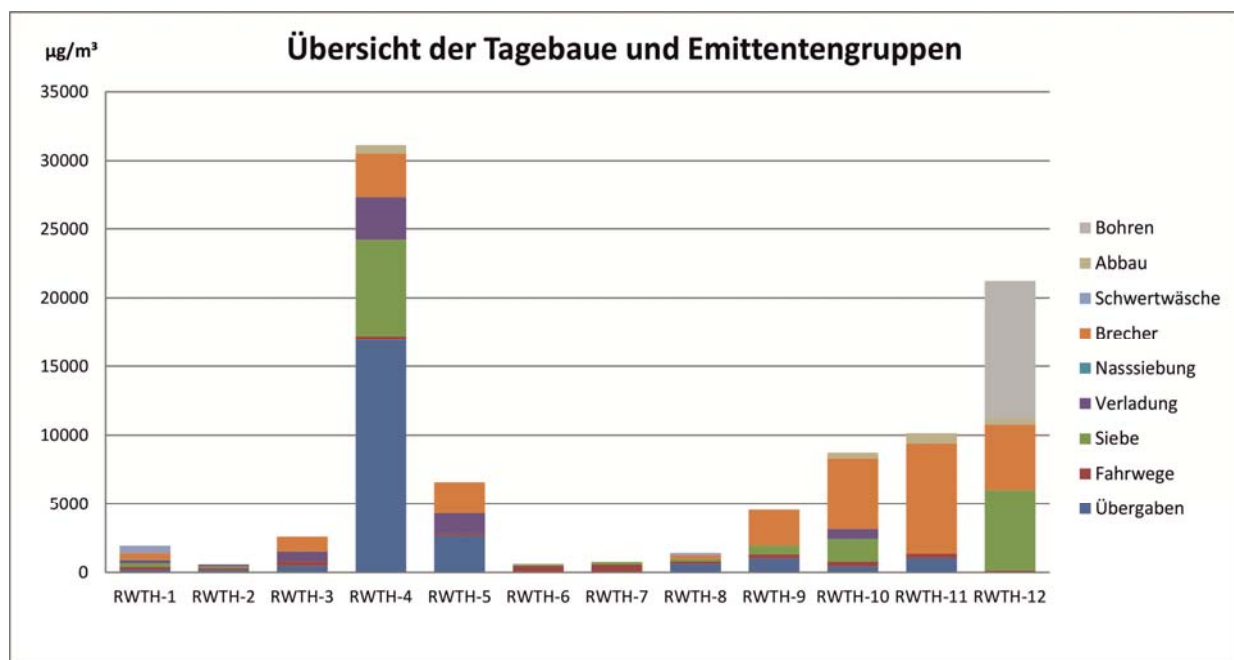


Abbildung 14: Übersicht der Tagebaue und ihrer Emittentengruppen

Abbildung 14 zeigt den Anteil der Emissionsgruppen der jeweiligen Feinstaubquellen der untersuchten Betriebe. Aufgrund der deutlichen quantitativen Unterschiede werden in den folgenden Abbildungen 15 und 16 Locker- und Festgesteinstagebaue getrennt voneinander dargestellt.



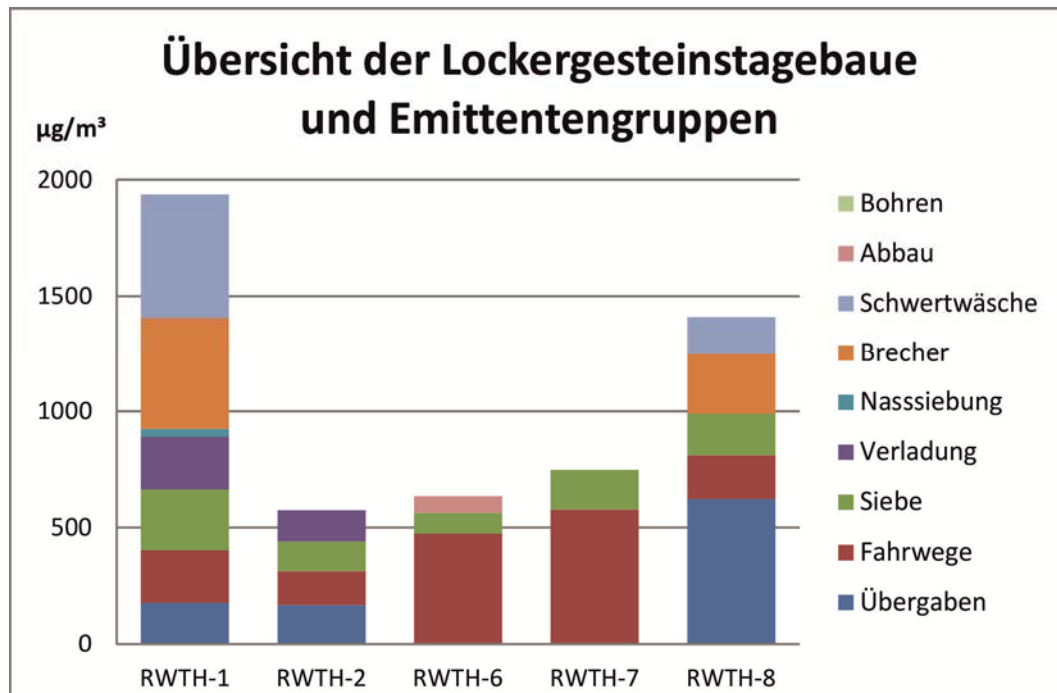


Abbildung 15: Anteile der Emittenten im Lockergesteinstagebau

Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, sind bei Lockergesteinstagebauen grundsätzlich die Feinstaubkonzentration an Übergaben, Sieben und Fahrwegen signifikant.

Eine Auswertung von Emissionen durch Brecher kann für Lockergesteinstagebaue anhand der Betriebe RWTH-1 und RWTH-8 vorgenommen werden. In den weiteren drei Betrieben wird nur sporadisch ein mobiler Brecher eingesetzt, um gelagertes Überkorn zu zerkleinern. Während der Messkampagnen in diesen Betrieben fand kein Brechereinsatz statt. Übergaben gibt es in den Tagebauen RWTH-6 und -7 nicht, hier finden kein Bandtransport und auch keine Aufhaldung über Bänder statt.

Die hohen Feinstaubemissionen an Übergaben und Sieben sind prozessbedingt. Durch die mechanische Beanspruchung des Materials wird Feinstaub freigesetzt. Darüber hinaus werden dem Material anhaftende Feinpartikel gelöst, was zusätzlich zur Feinstaubemission beiträgt.

Die Emissionen durch Fahrwege sind die zweitstärkste Feinstaubquelle. Besonders signifikant sind sie deshalb, weil sie im Tagebau großflächig auftreten. Jedoch variieren ihre Emissionsraten stark. Als Ursache kann die unterschiedliche Geschwindigkeit angenommen werden, mit denen sie befahren werden. Ein großer Teil der Verladung an die Abnehmer findet in der Grube statt, was mit einem hohen Verkehrsaufkommen im Tagebau verbunden ist. Während der Messkampagnen konnte beobachtet werden, dass insbesondere LKW bei Leerfahrten mit erhöhter Geschwindigkeit durch den Tagebau fahren und es dadurch zu einer massiven Staubentwicklung kommt.



Auch in den untersuchten Festgesteinstagebauen lassen sich signifikante Emissionsquellen hervorheben. Wie in Lockergesteinstagebauen sind hier insbesondere Siebe, Übergaben und die Verladung zu nennen. Jedoch sind die von ihnen ausgehenden Emissionen um ein Vielfaches höher als bei Lockergesteinstagebauen. Die höchsten Feinstaubemissionen entstehen bei der Materialzerkleinerung durch Brecher. Abbildung 16 gibt eine Übersicht über das Verhältnis der Emittentengruppen zueinander.

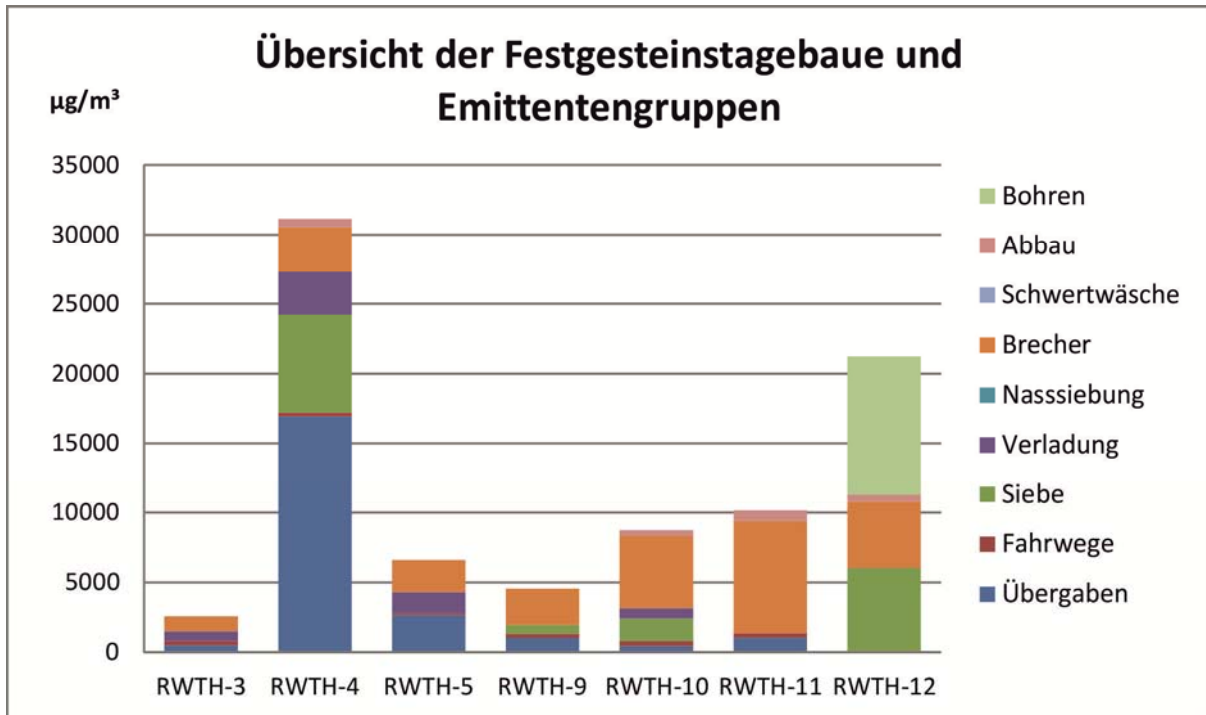


Abbildung 16: Anteile der Emittenten im Festgesteinstagebau

Aufgrund der höheren Anzahl der Prozessschritte, die für die Aufbereitung von Festgestein zu Produkten wie Schotter und Splitten notwendig sind, gibt es hier zahlreiche Übergaben, um das Material in die nächste Aufbereitungsstufe weiterzuleiten.

Die von Fahrwegen ausgehenden Emissionen wirken im Verhältnis geringfügig. Deswegen ungeachtet stellen sie eine erhebliche Feinstaubquelle dar, da sie nicht punktuell emittieren, sondern großflächig auftreten.

Für Tagebau RWTH-12 konnte eine zusätzliche Messung während der Bohrarbeiten für eine Sprengung durchgeführt werden. Die Feinstaubbelastung war hier mit fast 10.000 µg/m³ sehr hoch, zu berücksichtigen ist jedoch, dass Bohrungen nicht täglich vorkommen und nur sehr kurzzeitig Emissionen verursachen.

Wie bereits festgestellt wurde, gehen von Brechern die höchsten Feinstaubemissionen aus. Obwohl die Betriebe RWTH-10, -11 und besonders der Betrieb RWTH-12 im Vergleich zu den anderen Festgesteinsbetrieben geringere Produktionsleistungen haben, sind hier wesentlich höhere Feinstaubkonzentrationen gemessen worden. Ursächlich hierfür ist, dass in den übrigen Betrieben (RWTH-3, -4, -5 und -9) Maßnah-

men zur Staubeindämmung an Brechern existieren. Der Vergleich zwischen den gemessenen Feinstaubkonzentrationen an Brechern mit und ohne Einhausung belegt anschaulich den Wirkungsgrad solcher Maßnahmen. So ist an Brechern ohne Einhausung eine im Durchschnitt um den Faktor 2,7 höhere Feinstaubbelastung festzustellen. Sie beträgt durchschnittlich  $6.275 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dagegen beträgt sie an Brechern mit Einhausung nur noch  $2.300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Abbildung 17 zeigt die durchschnittlich gemessenen Feinstaubkonzentrationen an Brechern in den Untersuchungsbetrieben mit und ohne Einhausung.

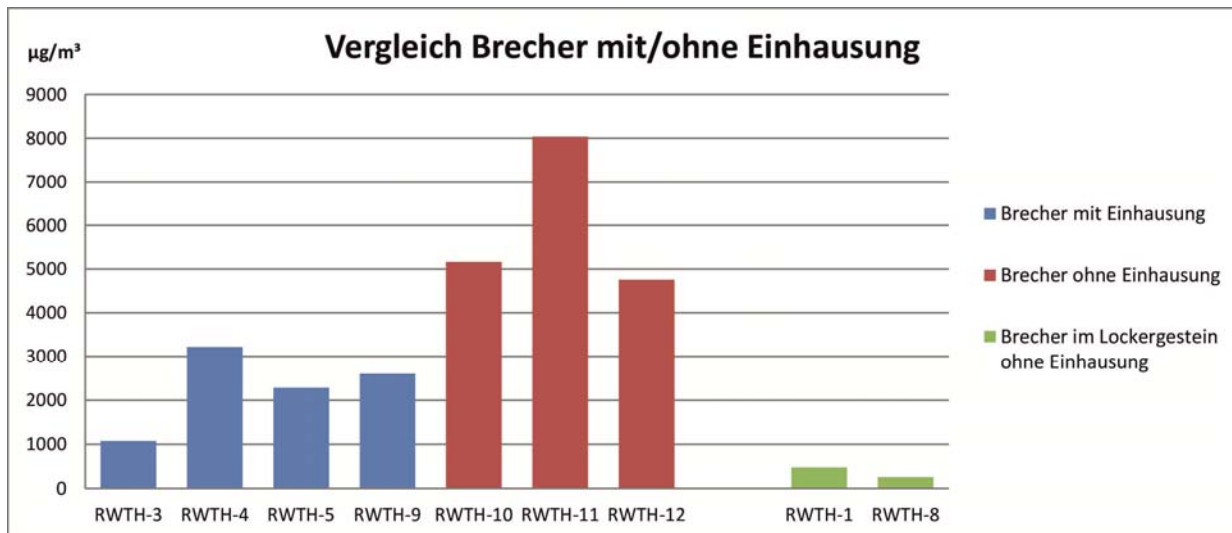


Abbildung 17: Feinstaubbelastung durch Brecher mit und ohne Einhausung

Wie bereits festgestellt wurde, stellen Fahrwege eine signifikante Feinstaubquelle im Tagebau dar, dies gilt für Locker- wie Festgesteinstagebaue gleichermaßen. Da es für Betriebe relativ einfach und kostengünstig ist, die von ihnen ausgehende Feinstaubentwicklung zu reduzieren, sollen sie hier genauer betrachtet werden.

Die Konzentrationen sind besonders hoch, wenn die Fahrwege nicht befestigt (asphaltiert) sind. Jedoch verursachen befestigte Wege, wenn sie nicht gereinigt werden, ebenfalls hohe Feinstaubemissionen. Im Durchschnitt wurden Feinstaubkonzentrationen von  $413 \mu\text{g}/\text{m}^3$  an unbefestigten bzw. nicht gereinigten Fahrwegen gemessen. Die Befeuchtung der Fahrwege bewirkt eine deutliche Minderung, durchschnittlich beträgt die Feinstaubkonzentration dann lediglich noch  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Insgesamt betrachtet ist die Feinstaubemission bei trockenem Zustand der Fahrwege somit um den Faktor 4,6 höher (vgl. Abbildung 18). Voraussetzung für eine Minderungswirkung ist allerdings eine rechtzeitige Wiederholung der Befeuchtung, da der Minderungseffekt je nach Witterungsverhältnissen nur kurz anhält.

Um die emissionsmindernde Wirkung von Bewässerungsmaßnahmen auf Fahrwegen zu verdeutlichen, sind in Abbildung 18 die Ergebnisse von Messungen an trockenen und feuchten Wegen dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Feinstaubbelastung an

Fahrwegen in Festgesteinstagebauen absolut betrachtet höher ist als in den Lockergesteinstagebauen (RWTH-1, -2, -6, -7 und -8).

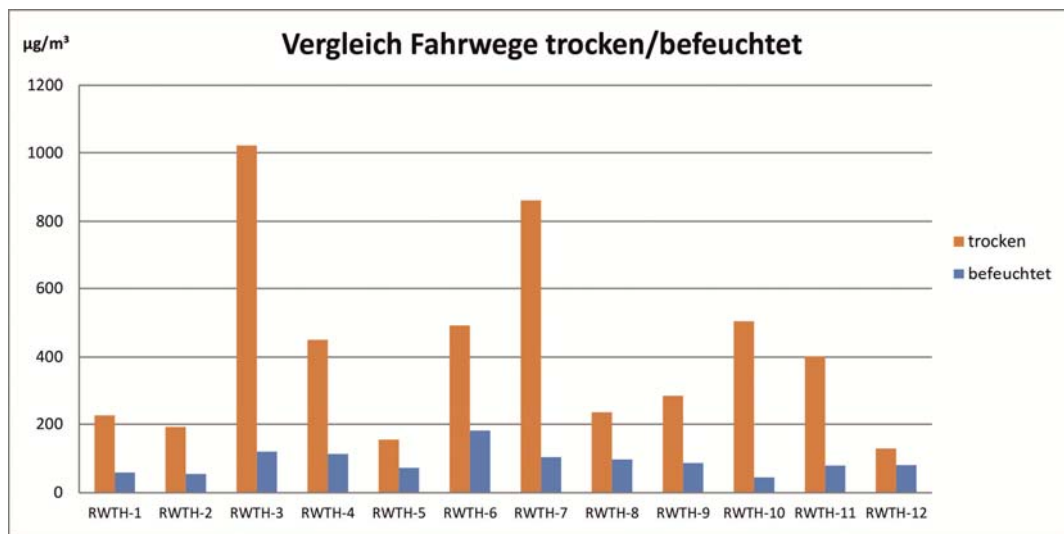


Abbildung 18: Vergleich der Feinstaubkonzentrationen an Fahrwegen

Die Wegebewässerung ist in jedem Fall bei Witterungen zu empfehlen, bei denen es für zwei oder mehr Tage niederschlagsfrei ist oder hohe Windgeschwindigkeiten vorherrschen, die den Boden austrocknen und den Staub aufwirbeln. Die Notwendigkeit, die Befeuchtung mehrmals zu wiederholen, wird in Abbildung 19 deutlich. Die dargestellte Messung fand zu einem Zeitpunkt statt, dem mehrere niederschlagsfreie Tage vorausgingen. Die unbefestigten Fahrwege waren ausgetrocknet und es war eine deutliche Staubaufwirbelung durch Fahrzeuge zu beobachten.

Gegen neun Uhr wurden die Wege per Tankwagen mit Wasser benetzt, sofort war eine deutliche Minderung der Feinstaubkonzentrationen zu verzeichnen. Die Wirkung ließ allerdings bereits nach einer Stunde nach, die Peaks der Feinstaubkonzentration durch vorbeifahrende Fahrzeuge fielen dann wieder stärker aus. Insgesamt reduzierte sich die Feinstaubbelastung nach der Bewässerung für rund drei Stunden um mehr als 50 %.

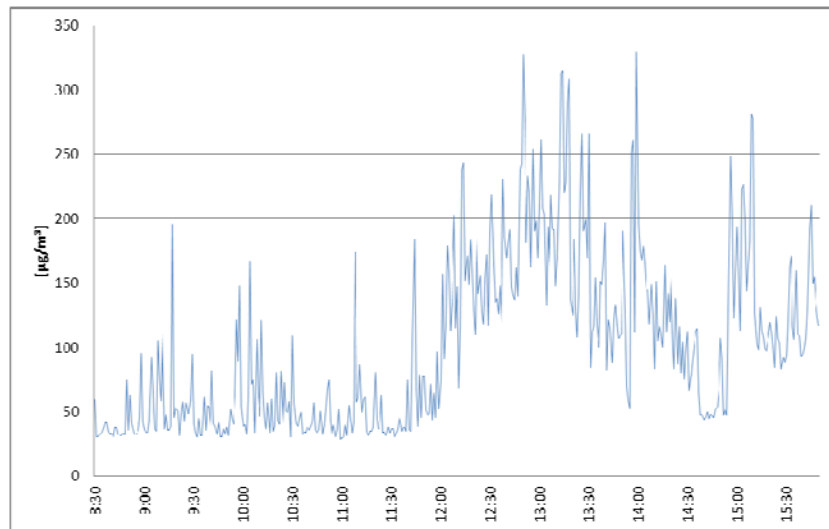


Abbildung 19: Konzentrationsverlauf an einem Fahrweg mit Bewässerungsmaßnahme

Eine weitere wirkungsvolle Maßnahme, um die Feinstaubemissionen von Fahrwegen zu reduzieren, stellen Geschwindigkeitsbegrenzungen dar. Zwar sind diese auf jedem Betriebsgelände ausgewiesen, die Praxis zeigt jedoch, dass diese überwiegend nicht eingehalten werden. Dies gilt insbesondere für Fremdfahrzeuge, die den Tagebau durchfahren. Der Vergleich der Messergebnisse an LKW-Fahrstrecken sowie an Radlader-Fahrstrecken weist deutlich darauf hin, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit eine bedeutende Rolle bezüglich der Höhe der Emissionen spielt.

Eine hier noch nicht behandelte Feinstaubquelle sind Gewinnungssprengungen. Die Durchführung der Messungen erwies sich in der Praxis als schwierig und es konnten keine quantifizierbaren Ergebnisse erzielt werden. Die aus Sicherheitsgründen einzuhaltenen Abstände zur Sprengung sowie die oft eingeschränkte Standortwahl aufgrund der Geländebeziehungen erschweren eine genaue Erfassung der Feinstaubentwicklung erheblich. Bei der Auswertung der Messergebnisse zeigten sich unterschiedlich starke Peaks, je nachdem, wie „günstig“ die Messgeräte zur Staubfahne standen. Es wurden allerdings größtenteils keine Effekte festgestellt. Dennoch soll hier ein Beispiel für eine Sprengmessung gezeigt werden, bei der eine Erhöhung der Feinstaubkonzentrationen unmittelbar nach der Sprengung registriert werden konnte. Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, waren die Feinstaubkonzentrationen für etwa drei Minuten erhöht, dann sanken sie wieder ab. Die leichteren Peaks vor und nach der Sprengung sind auf die Aktivitäten vor Ort zurückzuführen, da zunächst alle Fahrzeuge das Gefahrengebiet verlassen mussten und kurz nach der Sprengung der Regelbetrieb wieder aufgenommen wurde.

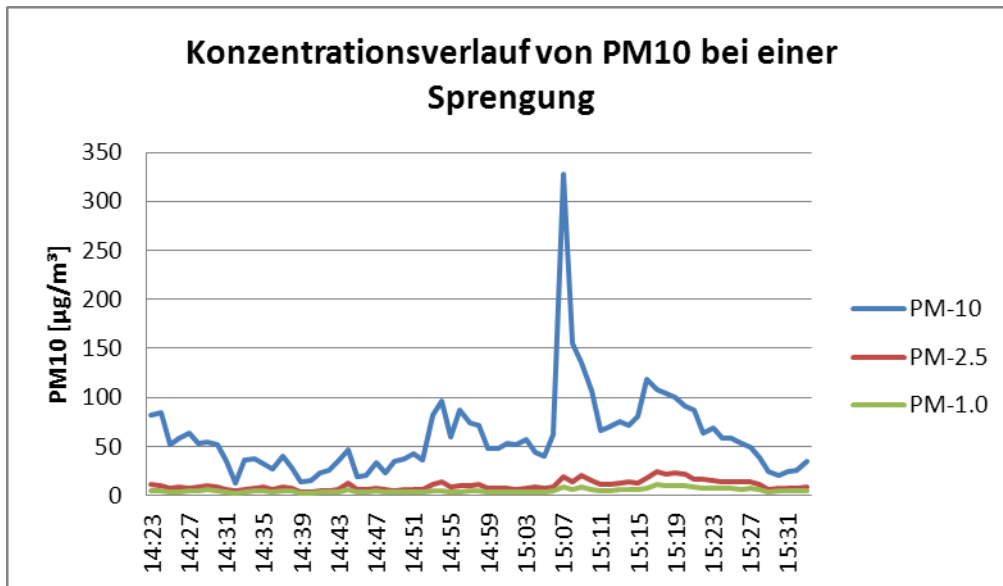


Abbildung 20: Konzentrationsverlauf von PM10 während einer Sprengung

Aufgrund des sehr kurzen Zeitraumes der Konzentrationserhöhung durch Sprengungen ist nicht zu erwarten, dass sie sich auf die Tagesmittelkonzentrationen auswirken. Dies sollte jedoch durch weitere Untersuchungen ermittelt werden.

### 3.3 Ergebnisse der Immissionsmessungen

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden insgesamt 157 Immissionsmessungen durchgeführt. Diese dienen der Erfassung der Ist-Situation der Feinstaubbelastung im Nahbereich der Tagebaue. Darüber hinaus dienen sie zur Beurteilung der Plausibilität der Ausbreitungsrechnungen.

Die durchgeführten Immissionsmessungen sind wie die Emissionsmessungen als Stichproben zur Ermittlung von Anhaltswerten zu betrachten. Auch für die Immissionsmessungen gilt, dass diese nur an niederschlagsfreien Tagen und während der Betriebszeiten durchgeführt wurden.

Für die Ermittlung der Zusatzbelastung durch die Betriebe wurden neben den eigenen Immissionsmessungen die Feinstaubmesswerte der Landesumweltämter herangezogen. Da alle untersuchten Betriebe in ländlichen Gebieten liegen, wurde jeweils die nächste Referenzmessstation mit ähnlicher Umgebungssituation gewählt. Die Differenz zwischen der tatsächlich gemessenen Immission und der von den Landesumweltämtern registrierten Hintergrundbelastung wird dabei als maximale Zusatzbelastung durch den Betrieb angenommen. Vernachlässigt werden dadurch andere Emittenten in räumlicher Nähe zum Tagebau wie z.B. landwirtschaftlich genutzte Flächen.

Von den insgesamt 157 Messtagen an 68 Messpunkten an der Peripherie der Betriebe weisen 27 Messtage erhöhte Werte während der acht- bis zehnstündigen Betriebszeit auf (Anhang V). Als auffällig sind Feinstaubkonzentrationen zu bewerten, die im Ta-

gesamtdurchschnitt den Grenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überschreiten. Vier Messpunkte lagen jedoch innerhalb der Betriebsflächen und fallen daher aus der Betrachtung heraus. Dies gilt für die Messpunkte x4 und x5 des Tagebaus RWTH-2, für x1 des Tagebaus RWTH-8 sowie x9 in Tagebau RWTH-12.

Nach Hinzuziehung der Hintergrundbelastung an den entsprechenden Messtagen und der Berechnung des sich daraus ergebenden Tagesdurchschnitts, ist letztendlich nur an fünf Messtagen eine Überschreitung zu konstatieren. Letztere betrifft vier Messpunkte, von denen wiederum drei durch Fahrwege in unmittelbarer Nähe einer erhöhten Emission ausgesetzt sind. Die Tagesmittelwerte wurden dabei aus der gemessenen durchschnittlichen Feinstaubkonzentration während der Betriebszeit und aus der Hintergrundbelastung während der Ruhezeit berechnet (vergleiche Anhang V).

Ungeachtet der Tatsache, dass die durchgeführten Messungen und Berechnungen überwiegend keine Grenzwertüberschreitungen in der Umgebung der Tagebaue belegen, ist die Feinstaubbelastung innerhalb der Betriebsfläche, insbesondere nahe der Anlagen, teilweise stark erhöht. Außer unmittelbar an den Emissionsquellen bzw. ihrer Staubfahne überschreiten die gemessenen Feinstaubkonzentrationen den für den Arbeits- und Gesundheitsschutz geltenden Richtwert für alveolengängigen Staub von  $3 \text{ mg}/\text{m}^3$  nicht (vergl. TRGS 900).

### **3.4 Berechnung von Immissionskatastern**

Für jeden Betrieb wurde mithilfe von Ausbreitungsrechnungen ein Immissionskataster berechnet, um den Wirkungsbereich ihrer Feinstaubquellen zu ermitteln. Hierbei wird berücksichtigt, dass nur während des Betriebszeitraumes Emissionen von Anlagen und Fahrwegen ausgehen. Die herrschende Hintergrundbelastung ist in den Berechnungen nicht enthalten, da der Fokus auf der Ermittlung der durch die Tagebaue hervorgerufenen Zusatzbelastung, d.h. ohne äußere Einflüsse, liegt.

Es besteht prinzipiell kein linearer Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen. Während des Transportes durch die Atmosphäre finden Verdünnungs- und Umwandlungsprozesse statt, die stark von den meteorologischen und topographischen Bedingungen abhängen. Um das Ausbreitungsverhalten von Feinstaub zu simulieren, müssen diese Faktoren in einem atmosphärischen Ausbreitungsmodell berücksichtigt werden [PRE96]. Ein im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickeltes und in der TA Luft gefordertes Modell stellt Austal2000 dar. Dem Programm liegt ein Lagrange'sches Partikelmodell zugrunde, das die Trajektorien von Partikeln durch die Atmosphäre berechnet. Lagrange-Modelle basieren auf den Erhaltungssätzen von Masse, Energie und Impuls und berücksichtigen die Turbulenz. Der Berechnung liegt ein dreidimensionales, zeitlich variables Windfeld zugrunde. Mit diesem Programm können beliebig viele Emissionsquellen mit unterschiedlichen Quellgeometrien zeitabhängig verarbeitet werden. Die Konzentrationsverteilung des Feinstaubes wird als

„räumlicher und zeitlicher Mittelwert über ein Volumenelement eines dreidimensionalen Auszählgitters und eines Zeitintervalls berechnet“ [LUA06].

Die Ergebnisse werden für den untersuchten Stoff so angegeben, wie ihre Immissionswerte in der TA Luft existieren. Für PM10 werden die Ergebnisdateien daher zum einen als Jahresmittelwert ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und zum anderen als maximaler Tagesmittelwert mit 35 Überschreitungen dargestellt, d.h. es wird der 36-höchste Tagesmittelwert ausgegeben. Dadurch wird nicht nur der Wirkungsbereich einer Emissionsquelle sichtbar sondern auch, ob Grenzwerte überschritten werden.

Für die Ausbreitungsrechnungen wurden für die Standorte repräsentative meteorologische Zeitreihen verwendet. Diese meteorologischen Zeitreihen müssen im AKTerm-Format vorliegen, da nur bei AKTerm-Zeitreihen die Wind- und Turbulenzdaten für ein gesamtes Jahr als Stundenwerte vorliegen. Auf Basis einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS-Format) können keine Tagesmittelwerte der Immissionszusatzbelastung bestimmt werden [ARG09].

Anhand der meteorologischen Zeitreihe und eines digitalen Geländemodells des Tagebaus berechnet das Programm eine Windfeldbibliothek, mit welcher der Einfluss der Topographie auf die Windverhältnisse berücksichtigt wird.

Die Ausgabedatei zeigt die Feinstaubkonzentrationen der nahen Bodenschicht bis zu einer Höhe von drei Metern an. In diesem Bereich liegt auch die vorgeschriebene Höhe für Immissionsmessungen von 1,50 bis 4,50 m.

Vorhandene größere Gebäude oder Anlagen wurden bei den Ausbreitungsrechnungen mit einer Gebäude-Aufrasterung editiert, um diese bei der Staubausbreitung zu berücksichtigen.

Es muss ebenfalls ein Zeitszenario editiert werden, das die Betriebszeiten wiedergibt, da die Emissionen vorwiegend während dieser Stunden auftreten. Die Zeit-Szenarien wurden nach Angaben der Betriebsleiter für jeden Betrieb individuell festgelegt. Hierbei waren neben den regulären Betriebszeiten auch Stillstandzeiten während Winterreparaturen o.ä. zu berücksichtigen. Die Betriebszeiten, mit denen die Ausbreitungsrechnungen durchgeführt wurden, sind jeweils auf der Ergebnisdatei unter „Bemerkungen“ zu dokumentiert.

Die Immissionskataster wurden für alle Tagebaue sowohl für die Beurteilung der Feinstaubbelastung im Hinblick auf den zulässigen Jahresmittelwert als auch auf die zulässige Überschreitungshäufigkeit des Tagesmittelwertes erstellt. Es existieren daher für jeden Tagebau zwei Immissionskataster. Hier wird ebenfalls jeweils die höchste auftretende Feinstaubkonzentration innerhalb der beiden Bezugszeiträume angegeben. In Abbildung 21 ist ein Beispiel einer Ergebnisdatei dargestellt.

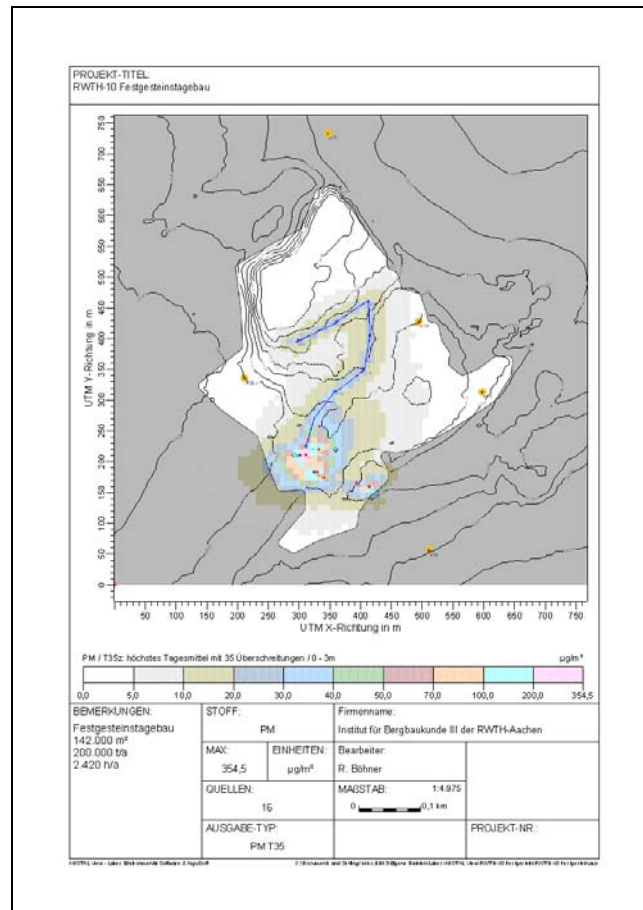


Abbildung 21: Ergebnisdatei einer Ausbreitungsrechnung

In den Berechnungen wurden sowohl Punktquellen als auch Linienquellen (Fahrwege) berücksichtigt. Die Standorte der Immissionsmessungen sind mit gelben Punkten markiert und einer Messpunkt-Bezeichnung beschriftet.

Insgesamt zeigen die Immissionskataster, dass es innerhalb der Tagebaue an mindestens 35 Tagen im Jahr zu erhöhten Feinstaubkonzentrationen kommen kann. Die Immissionskataster des Jahresmittelwertes zeigen ebenfalls teilweise eine zu hohe Belastung innerhalb der Tagebaue (vgl. Anhang VII). Jedoch wird der Arbeitsplatzgrenzwert nach TRGS 900 von  $3 \text{ mg/m}^3$  in keinem Fall überschritten. Im Nahbereich der Betriebe können überwiegend keine hohen Belastungen im Sinne von Grenzwertüberschreitungen festgestellt werden. Zu beachten ist auch, dass die zu Grunde gelegten Messergebnisse ausschließlich bei trockener Witterung ermittelt wurden. Sie stellen daher tendenziell hohe Werte dar, da keine Daten über emissionschwache Tage mit Niederschlägen erfasst wurden.

Die Ausbreitungsrechnungen zeigen darüber hinaus, dass nicht allein die vom Betrieb ausgehenden Emissionen für die Feinstaubbelastung in der Umgebung eine Rolle spielen. Beispielsweise sind bei den Betrieben RWTH-4 und RWTH-11, die die höchsten Feinstaubkonzentration an Anlagen aufweisen, nicht auch die höchsten Tages- und Jahresmittelwerte zu verzeichnen. Dies gilt auch für die übrigen Untersuchungsbetriebe. Zwar ist festzustellen, dass die Emissionen der Festgesteinstagebaue höher



sind als die der Lockergesteinstagebaue, jedoch steht dieser Umstand nicht im gleichen Verhältnis mit der tatsächlichen Höhe der Immissionen. Eine wesentliche Rolle für die tatsächliche Feinstaubbelastung durch die Betriebe spielen die meteorologischen Verhältnisse, insbesondere die Windgeschwindigkeit, in Zusammenhang mit der Topographie. Dadurch spielt auch die Höhe der Quelle eine bedeutende Rolle. Emissionen aus Aufbereitungsanlagen die in einigen Metern Höhe freigesetzt werden, werden vom Wind rasch verdünnt und abtransportiert. Dadurch wirken sie sich geringfügiger auf die Immissionssituation aus als bodennahe Feinstaubquellen. Aus diesem Grund ist die Angabe der Quellhöhe ein wichtiger Parameter bei der Berechnung des Wirkungsbereiches von Emittenten. Bei der Beurteilung der Immissionskataster ist darüber hinaus zu beachten, dass es in Betrieben, in denen die Hauptemittenten räumlich dichter zueinander stehen, höhere Feinstaubkonzentrationen auftreten. Hier kommt es zu einer Überlagerung der Emissionen. Auch die unterschiedlichen Betriebszeiten, während der Feinstaub emittiert wird, muss bei der Beurteilung berücksichtigt werden. Eine hohe Emissionsrate kann sich aufgrund kurzer Emissionszeiträume als weniger bedeutend herausstellen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Feinstaubbelastung dargestellt.

### **3.5 Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Feinstaubbelastung**

Sowohl die Immissionsmessungen im Umfeld der Tagebaue als auch die Ausbreitungsrechnungen haben gezeigt, dass nicht zwingend die Betriebe, von denen die höchsten Emissionen hervorgehen, auch diejenigen sind, in dessen Nahbereich die höchste Feinstaubbelastung auftritt. Meteorologische sowie topographische Einflüsse müssen hierfür ursächlich sein. Daher wurde der Einfluss dieser Parameter genauer untersucht, die Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch anhand ausgewählter Szenarien dargestellt.

#### **3.5.1 Einfluss von Meteorologie und Topographie**

Zur besseren Veranschaulichung wird in den Szenarien nur eine Quelle verwendet. Emissionsrate, Emissionszeitraum sowie die Position der Quelle sind in den ersten zwei Szenarien identisch. Darüber hinaus wird dieselbe meteorologische Zeitreihe verwendet. Folgende Parameter liegen den Berechnungen zugrunde: Emissionsrate der Quelle: 0,17 g/s, Emissionszeitraum: 2.610 h/a. Hauptwindrichtungen der meteorologischen Zeitreihe: Nordwest / Südwest. Das Geländemodell entspricht dem des Tagebaus RWTH-11.

Abbildung 22 zeigt das Ergebnis, zur besseren Darstellung der Unterschiede wird in diesem Fall der Jahresmittelwert herangezogen.

Bei ebenem Gelände und damit freier Anströmung der Emissionsquelle durch den Wind, ist der maximale Jahresmittelwert geringer als in gegliedertem Gelände. Topographische Hindernisse können hier weder zu einer Ablenkung der Windrichtung noch zu einer Reduzierung der Windgeschwindigkeit führen. Auch kommt es zu keinen mikroklimatischen Modifikationen wie Quer- oder Hangaufwinden. In diesem Szenario wird der zulässige Jahresmittelwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht erreicht. Im Gegensatz dazu wird bei dem hier betrachteten gegliederten Gelände der zulässige Jahresmittelwert bis zu einem Abstand von 20 Metern zur Quelle überschritten. Der Maximalwert liegt hier bei  $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

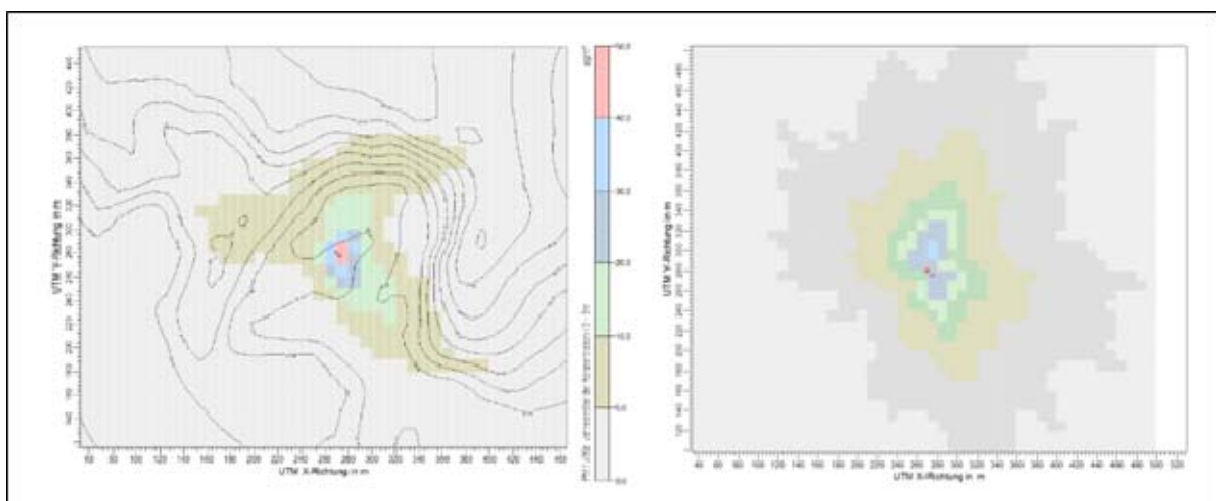


Abbildung 22: Feinstaubbelastung in gegliedertem und ebenem Gelände

Der Unterschied des maximalen Tagesmittelwertes mit 35 Überschreitungen beträgt  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in ebenem Gelände gegenüber  $164 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in gegliedertem Gelände. Die Feinstaubkonzentration ist somit in gegliedertem Gelände um 20 % höher.

Das Ergebnis zeigt darüber hinaus, dass der Wirkungsbereich einer Emissionsquelle bei ebenen Geländebeziehungen größer ist. Hier kommt es zu einer raschen Verdünnung der Feinstaubkonzentrationen aufgrund der Durchmischung von Luftschichten, allerdings führt dies auch zu einer größer-flächigen Verteilung. In gegliedertem Gelände kommt es zur Akkumulation in geschützten Bereichen mit verminderter Windgeschwindigkeit, die sich in erhöhten Werten widerspiegelt. Die tagsüber an Böschungen entstehenden Hangaufwinde transportieren zwar einen Teil der Schadstoffe in die Höhe und über die Abbaukante hinaus, jedoch verbleibt ein großer Anteil in der Gewinnungsfläche.

In Abbildung 23 ist das Szenario mit Geländemodell als Tagesmittel mit 35 Überschreitungen dargestellt. Die Quelle kann von den überwiegend aus Richtung Westen kommenden Winden angeströmt werden. Aufgrund der steilen Böschungen im Osten erfährt die Luftströmung jedoch eine Ablenkung in nördliche und südliche Richtung.

Hier breitet sich der Feinstaub der Geländeform entsprechend stärker aus. Sichtbar ist ebenfalls der Einfluss von Hangaufwinden, die einen Teil des Feinstaubes über die Böschung hinaus in die Umgebung transportieren. Die maximale Feinstaubkonzentration in Quellnähe beträgt rund  $164 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Wirkungsbereich der Feinstaubbelastung von mehr als  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt ca. 65 m in Nord-Süd und 30 m in Ost-West-Richtung. Das maximal erreichte Tagesmittel beträgt  $986 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

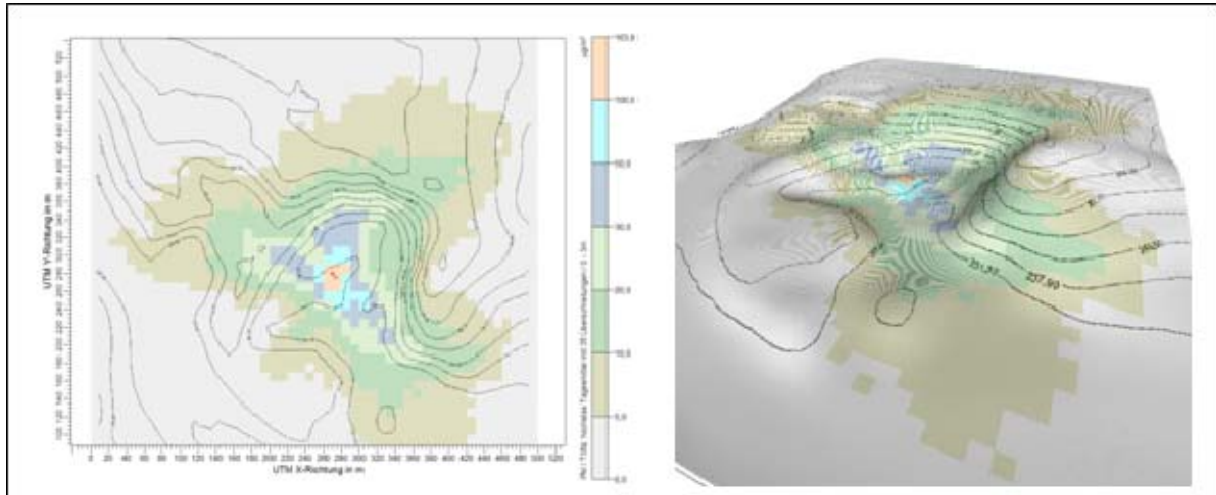


Abbildung 23: Ausbreitungsszenario für gegliedertes Gelände

In einem weiteren Szenario wurde die Position der Emissionsquelle so verändert, dass sie sich hinter einer Böschung und damit weniger windexponiert befindet. Das Ergebnis zeigt eine mittlere Feinstaubkonzentration mit 35 Überschreitungen von  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der maximal erreichte Tagesmittelwert liegt hier sogar bei  $1.705 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , und damit nahezu zweimal so hoch wie beim zuvor berechneten Szenario. Auch der Wirkungsbereich des kritischen Tagesmittels ist hier größer mit einer Nord-Süd-Ausdehnung von 130 Metern und einer Ost-West-Ausdehnung von 90 Metern. Grund dafür ist zum einen die Behinderung der Luftströmung, wodurch die Windgeschwindigkeit an der Quelle sowie der Transport von unbelasteter Luft hierher vermindert ist. Zum anderen kommt es aufgrund der räumlichen Begrenzung durch die Böschung zu einer Ablenkung der Luftströmung in Richtung Norden und Süden in topographisch weniger gegliedertes Gelände (vgl. Abbildung 24).

Ist die Exposition der Anlagen zum Wind behindert, oder wird die Windgeschwindigkeit aufgrund der Topographie zu stark reduziert, verbleibt also ein Großteil des Feinstaubes innerhalb der Betriebsfläche. Dies bedeutet eine erhebliche Beeinträchtigung der Luftqualität, der das Personal ausgesetzt ist. Darüber hinaus führt der dauerhafte Staubgehalt der Luft zu erheblichem Verschleiß an Maschinen und Anlagen.

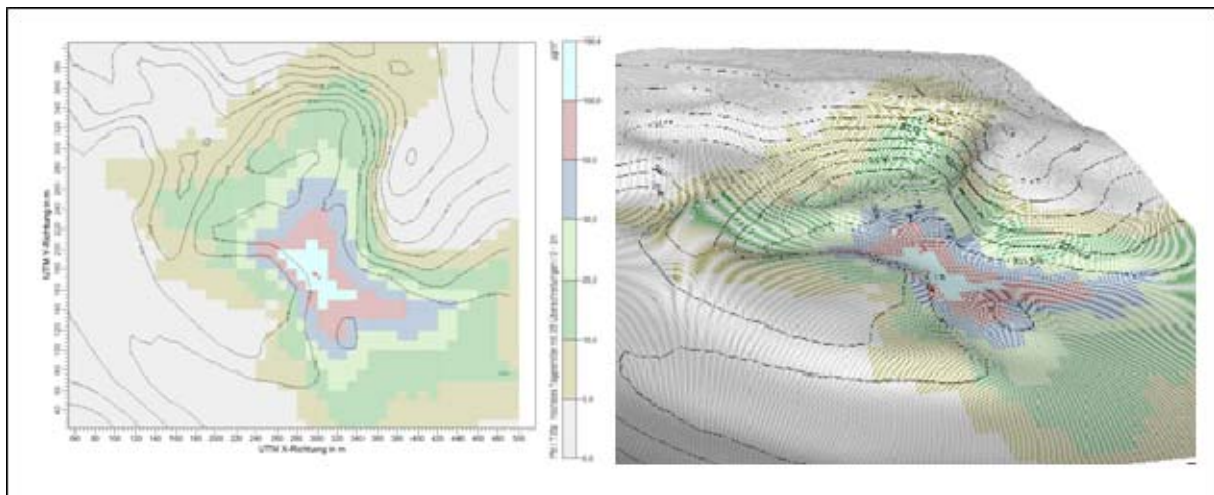


Abbildung 24: Ausbreitungsszenario bei Veränderung der Emissionsposition

Die Szenarien zeigen den Zusammenhang zwischen topographisch bedingten kleinräumigen Veränderungen der Windverhältnisse und der damit verbundenen Feinstaubbelastung. Im Folgenden soll konkret untersucht werden, was dies im Hinblick auf den Tagebauzuschnitt bedeutet. Das Geländemodell entspricht dem des Tagebaus RWTH-12. Die Gewinnungsseite mit ihrer steilen Böschung liegt hier im Westen. Der Wind kann somit den Tagebau und damit die Emissionsquellen nicht ungehindert durchströmen.

Die Emissionsrate, Emissionsdauer sowie die meteorologische Zeitreihe wurden beibehalten.

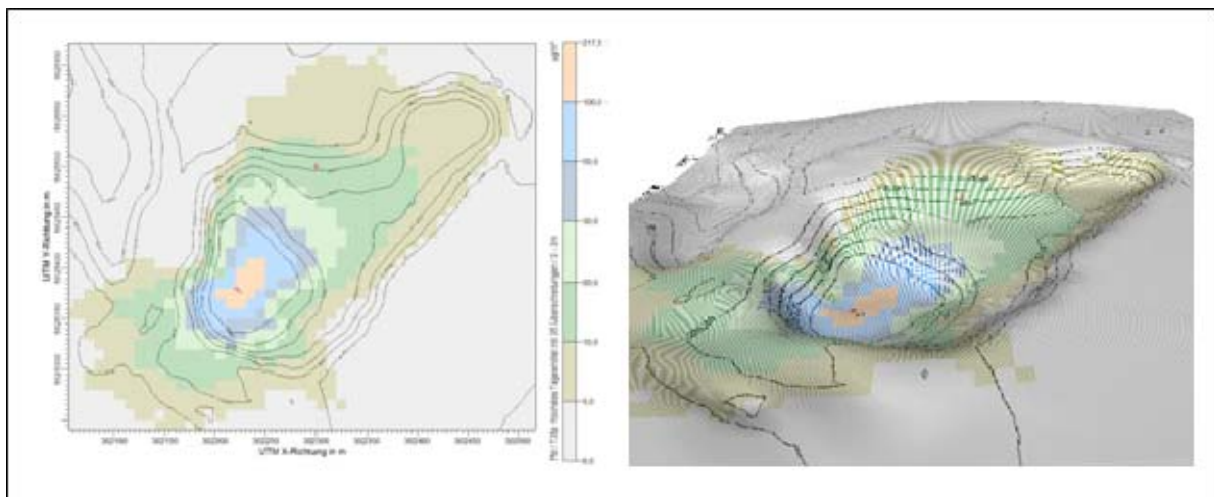


Abbildung 25: Einfluss des Tagebauzuschnitts auf die Feinstaubbelastung

Das Ergebnis sind wesentlich höhere Feinstaubkonzentrationen als in den vorhergehenden Szenarien (vgl. Abbildung 25). Der maximal erreichte Tagesmittelwert ist mit  $1.230 \mu\text{g}/\text{m}^3$  geringer, jedoch beträgt der Tagesmittelwert mit 35 Überschreitungen  $217 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und ist damit hier höher. Der Wirkungsbereich innerhalb dessen  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überschritten werden umfasst 115 m in Richtung Nordost-Südwest sowie 60 m Nordwest-Südost. Wie aufgrund der vorangegangenen Ergebnisse zu erwarten war, bedin-

gen die verminderte Durchströmung sowie die reduzierte Windgeschwindigkeit im Tagebau hier erhöhte Werte.

Als günstig stellt sich daher ein Tagebauzuschnitt heraus, bei dem die staubintensiven Anlagen vom Wind möglichst frei angeströmt werden können, und dadurch eine direkte Verdünnung der Feinstaubkonzentration begünstigt wird. Die Windgeschwindigkeit sollte im weiteren Verlauf durch die Gewinnungsfläche mit ihren hohen Böschungen verringert werden um den Austrag des Staubes aus dem Tagebau zu vermindern.

Der Vergleich der unterschiedlichen Szenarien verdeutlicht die Wechselwirkung zwischen Topographie und Meteorologie. Mikroklimatisch auftretende Modifikationen des Windfeldes beeinflussen sowohl die Dispersion als auch die Deposition von Feinstaub.

Die Art der Ausprägung lokaler Windverhältnisse steht außerdem in direktem Zusammenhang mit den Tages- und Jahreszeiten. Ausbreitungsrechnungen bilden Mittelwerte ab. Der Einfluss kurzzeitiger, kleinräumiger Modifikationen der Windverhältnisse und die damit verbundene Staubausbreitung kann daher nicht in diesen zeitlichen Maßstäben abgebildet werden, diese ist daher als mittlere Verteilung und Konzentration zu verstehen.

### **3.5.2 Einfluss von Minderungsmaßnahmen**

Der Einfluss von Minderungsmaßnahmen auf die Immissionssituation soll exemplarisch an einem Tagebau dargestellt werden. Dabei soll quantifiziert werden, in welchem Maße die eingesetzten Maßnahmen eine Senkung der Feinstaubkonzentrationen bewirken können. Hierbei wurden die Quellstärken bei den Betrieben, die keine oder nur bedingt Staubschutzmaßnahmen einsetzen, so verändert, als seien dort Maßnahmen vorhanden. Die Vorgehensweise wird anhand des folgenden Beispiels erläutert.

Grundlage des Beispiels ist der Tagebau RWTH-10. Gegenüber der Ist-Situation wird unterstellt, dass Brecher- und Siebanlage eingehaust sind und die von Fahrwegen ausgehenden Emissionen denen von befeuchteten Fahrwegen entsprechen. Die Emissionsrate wurde auf Grundlage der durchschnittlichen Minderungswirkung von Maßnahmen neu berechnet. Die Emissionen der Radlader-SKW-Beladung wurden beibehalten, da es für diesen Vorgang derzeit noch kein praktikables Mittel zur Staubreduzierung gibt.

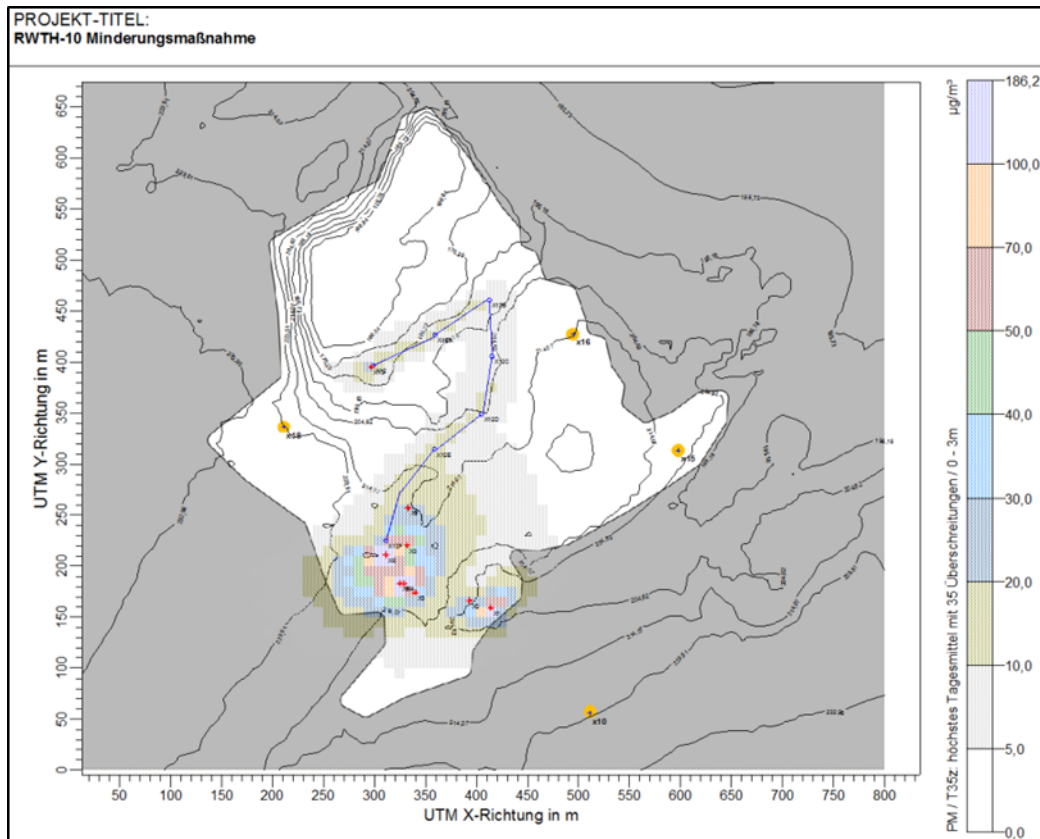


Abbildung 26: Immissionssituation nach Einsatz von Minderungsmaßnahmen

Abbildung 26 zeigt das simulierte Immissionskataster bei unterstellten Minderungsmaßnahmen. Der Vergleich mit der Ausgangssituation (Immissionsszenario Anhang VII) zeigt den deutlichen Rückgang der Staubkonzentration. Die Immissionen betragen im Tagesmittel nicht mehr als  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der höchste Tagesmittelwert mit 35 Überschreitungen im Jahr beträgt hier noch  $186,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , demgegenüber ist er bei der Ausbreitungsrechnung mit realen Emissionswerten mit  $354,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nahezu doppelt so hoch. Der Jahresmittelwert ist beim Einsatz von Minderungsmaßnahmen mit  $70,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gegenüber  $139,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  um nahezu 50 % geringer.

### 3.5.3 Einfluss von Grünstreifen

Alle Pflanzen filtern Staub und gasförmige Verunreinigungen aus der Luft. Dies geschieht im Wesentlichen durch zwei Vorgänge. Zum einen haben Pflanzen einen direkten Effekt auf die Bindung von Feinstaub durch ihre Blätter. Durch Depositionsvorgänge bleiben die Partikel auf der Blattoberfläche haften. Dabei ist die Form der Blätter entscheidend für die Wirkung. Am effektivsten filtern Nadelbäume sowie Laubbäume mit rauen, behaarten oder klebrigen Blättern Feinstaub aus der Luft. Durch Niederschläge kann dieser später ausgewaschen werden. Gelangen die Partikel so in den Boden oder in die Kanalisation, ist eine Resuspension nicht mehr möglich.



Darüber hinaus wirkt Vegetation auch indirekt auf die lokale Feinstaubkonzentration, indem sie die Windgeschwindigkeit und Turbulenz verändert und für eine Durchmischung von belasteter und unbelasteter Luft sorgt. Die Effizienz der reinigenden Wirkung ist stark abhängig von der Art der Pflanzen. Bäume haben mit ihrer Krone eine große, diffuse Oberfläche und stellen damit ein größeres Hindernis für den Wind dar als niedrige Bepflanzung. Die Luftfilterungsmöglichkeit verbessert sich bei abwechslungsreicher Bepflanzung, die unterschiedliche Höhen aufweist und teilweise durchlässig ist [ASP07].

Um eine effektive Filterwirkung zu erzielen, sollten die Baumbestände möglichst nahe an der Emissionsquelle liegen oder zumindest in Bezug auf die Windrichtung so liegen, dass die belastete Luft sie durchströmen kann.

Hinsichtlich der Effektivität von Pflanzen in Bezug auf die Feinstaubfilterung bestehen folgende Grundsätze:

1. Nadelbäume filtern effektiver als Laubbäume.
2. Laubbaumblätter mit rauen und behaarten Blättern filtern effektiver als glatte und flache Blätter.
3. Immergrüne Arten filtern Feinstaub auch im Winter und sind daher insgesamt wirkungsvoller.
4. Das Vermögen der Feinstaubfilterung der Blätter ist abhängig von der Größe und dem Mikrorelief der Blattoberfläche.
5. Von der Luft durchströmbare Pflanzungen filtern durch die gute Durchlässigkeit besser als dichte Pflanzungen.
6. Wirkungsvoll sind in der Höhe gut strukturierte Pflanzenbestände in Form der Kombination von aufgeasteten Bäumen mit einer Unterbepflanzung von krautigen Pflanzen und Sträuchern, da die Blattmasse durch die dreistufige Struktur verschiedene Höhen aufweist [GAL08].

Vegetationsbestände können aber auch an bestimmten Stellen zu einer Konzentrationserhöhung führen. Ist die Vegetation zu dicht, d.h. ist die Durchlässigkeit für einen Luftaustausch zu gering, steigt die Feinstaubkonzentration, die bodennahe Durchmischung der Luftschichten ist dann zu gering und kann somit eine lokale Anreicherung bewirken. Für Feinstaub gilt dies, wenn die Durchlässigkeit der Bepflanzung kleiner ist als 40 % [WES04].

Eine Simulation der Wirkung von Vegetation als Feinstaubfilter war nicht möglich. Es können bei der Berechnung zwar Hindernisse berücksichtigt werden, jedoch ist es mit der bestehenden Software nicht möglich, die Durchlässigkeit eines Pflanzenbestandes nachzubilden. Am Tagebaurand und überwiegend auch noch auf der Betriebsfläche selbst finden sich in den Tagebauen Grünbestände. Darüber hinaus liegen alle Tagebaue im ländlich geprägten Raum. Es ist sowohl aufgrund der Angaben in der Literatur als auch aufgrund der gemessenen Immissionswerte durchaus anzunehmen, dass hier eine reinigende Wirkung durch die Pflanzenbestände im Umkreis der Tagebaue erzielt wird. Aufgrund der nur kurzen Messzeiträume kann dies jedoch nicht durch Da-

ten belegt werden. Es ist aber sowohl aufgrund der Angaben in der Literatur, als auch aufgrund des Einflusses der meteorologischen Verhältnisse zu empfehlen, Baumreihen so zu positionieren, dass sie hinter der Emission und zur Hauptwindrichtung stehen und somit die Anströmung der Anlagen durch den Wind nicht behindern.

### 3.6 Beurteilung des Staubungsverhaltens

In den Untersuchungsbetrieben wurden Materialproben an Aufbereitungsanlagen entnommen, um im Labor deren Staubungsverhalten zu ermitteln. Je Betrieb wurde eine Probe untersucht. Hierzu wurde das Institut für Gefahrstoff-Forschung der Bergbau-Berufsgenossenschaft an der Ruhr Universität Bochum beauftragt (IGF). Das Institut führt Prüfungen zum Staubungsverhalten (A- und E-Staub) von pulverförmigen Substanzen (bis max. 30 mm) gemäß DIN 33879 – Teil 2 „Kontinuierlicher Fall im Gegenstrom“ und EN 15051 Methode B „Continuous Drop“ durch [IGF11]. Beurteilt wird dabei die Staubentwicklung bei Fallvorgängen. Das Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des so genannten „Heubach-Verfahrens“ dar. Die Methodik „Continuous Drop“ ist als einziges Verfahren in der Lage, das Staubungsverhalten von pulverförmigen Produkten ohne verfahrensbedingtes Verändern (Stressen) der Materialien zu überprüfen. Es finden keine Veränderungen der Korngrößen (Auflösen von Agglomeraten oder Aggregaten) und keine Fraktionierungen während der Fallversuche statt. <sup>1</sup>

Die vom IGF geführte Datenbank ermöglicht zudem einen Vergleich zu anderen mit demselben Verfahren untersuchten Schüttgütern. Auf der Basis von zurzeit ca. 660 ausgewerteten Messungen kann die Staubungsneigung beurteilt werden. Durch Bildung des Quotienten aus dem Rang der zu beurteilenden Probe und der Gesamtzahl aller Proben ergibt sich eine Zahl zwischen nahe 0 (geringste Staubungsneigung) und 1 (maximale Staubungsneigung), diese wird zur Bewertung herangezogen.

Die EN 15051 gibt für die Methode B die in Tabelle 3 dargestellte, festgeschriebene Klassifikation vor. Dabei repräsentiert  $W_R$  die Staubungszahl für den alveolengängigen Staub und  $W_i$  für den einatembaren Staub.

---

<sup>1</sup> „Aus dem Probenbehälter wird das Prüfgut mittels Dosierrinne mit einem eingestellten Fallmassenstrom von ca. 8 g/min ( $\pm$  2 g/min) über ein Fallrohr in das Strömungsrohr ausgetragen. Ein Gegenluftstrom (0,05 m/s) wird über eine Pumpe mit kritischer Düse erzeugt und strömt über Bohrungen. Oberhalb des Staubaustrages werden der alveolengängige A Staub und der einatembare E-Staub (Definition gemäß DIN EN 481) durch zeitgleiche Teilstromentnahme mit den BIA-Messköpfen FSP (A-Staub), bestückt mit Membranfiltern mit 37 mm Durchmesser, und GSP (E-Staub), bestückt mit Filterhülsen 10 mm x 50 mm, gemessen. Die standardisierte Mindest-Messdauer beträgt 10 Minuten. Sie kann zur Verbesserung der Nachweisstärke verlängert werden“ [IGF11].



Tabelle 2: Klassifizierung zur Beurteilung der Staubungskenngrößen  $W_R$  und  $W_i$  [IGF11]

<b>Staubungsneigung</b>	<b>A-Staubwert <math>W_R</math></b>	<b>E-Staubwert <math>W_i</math></b>
staubarm (very low)	< 25	< 250
gering staubend (low)	25 - 125	250 - 2500
staubend (moderate)	125 - 1250	2500 - 12500
stark staubend (high)	> 1250	> 12500

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse befinden sich in Anhang III. Für die Probe RWTH-8 konnte kein Ergebnis bestimmt werden, da sie sich aufgrund der Korngröße im Fallrohr nicht ungehindert fördern ließ. In Tabelle 3 sind die untersuchten Materialproben der Betriebe zusammengefasst.

Tabelle 3: Materialproben zur Untersuchung des Staubungsverhaltens

<b>Kennung</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Material</b>
RWTH-1	Sieb / x10	Kies 2-4
RWTH-2	Verladung / x9	Quarzsand < 5 mm
RWTH-3	Verladung / x1	Splitt 0/16
RWTH-4	Sieb / x8	Steinerde 0/25
RWTH-5	Übergabe / x8	Splitt 0/4
RWTH-6	Sieb / x1	Sand 2/4
RWTH-7	Sieb / x2	Sand 2/4
RWTH-8	Übergabe / x2	Kies 0/32
RWTH-9	Sieb / x11	Splitt 0/8
RWTH-10	Sieb / x8	Splitt 0/4
RWTH-11	Übergabe / x8	Steinerde 0-32
RWTH-12	Sieb / x2	Steinerde 0-32

Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der Klassifizierung der Proben dargestellt. Für die Beurteilung der vom Material ausgehenden Feinstaubemissionen ist der  $W_R$ -Wert von Bedeutung, der den Staubwert für den alveolengängigen Staub wiedergibt. Die Werte in den Klammern geben den insgesamt unter den Bedingungen im Fallrohr freigesetzten Staubanteil in mg/kg Fallmasse an, unterschieden nach A- und E-Staub. Zur besseren Beurteilung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS 900) Arbeitsplatzgrenzwerte für die Konzentration für einatembaren Staub von  $10 \text{ mg/m}^3$  und für alveolengängigen Staub von  $3 \text{ mg/m}^3$  vorgibt.

Tabelle 4: Klassifizierung der Materialproben [IGF11]

Probe	Staubungsneigung hinsichtlich	
	A-Staub	E-Staub
RWTH 1	staubarm (5,3)	gering staubend (318)
RWTH-2	staubarm (8,75)	staubarm (53,6)
RWTH-3	staubarm (10,6)	staubarm (237)
RWTH-4	staubarm (5,04)	staubarm (81,4)
RWTH-5	staubarm (3,71)	staubarm (81,9)
RWTH-6	staubarm (5,04)	staubarm (74,8)
RWTH-7	staubarm (5,3)	staubarm (58,6)
RWTH-9	staubarm (5,83)	staubarm (18,8)
RWTH-10	staubarm (7,16)	staubarm (129)
RWTH-11	staubarm (4,77)	staubarm (94,4)
RWTH-12	staubarm (3,98)	staubarm (89,1)

Anhand der Laborversuche konnten keine signifikanten Unterschiede des Staubungsverhaltens bei den Materialproben festgestellt werden. Alle Materialproben wurden bezogen auf die Staubungsneigung von alveolengängigem Staub als „staubarm“ klassifiziert. Das gleiche Ergebnis wurde bei der Untersuchung des Staubungsverhaltens hinsichtlich des einatembaren Staubes erzielt, lediglich eine Probe wurde hier als „gering staubend“ klassifiziert. Zur Beurteilung dieser Ergebnisse kann die Bewertung der Staubungsneigung nach VDI 3790 Blatt 3 hinzugezogen werden. Demnach wird die Staubentwicklung von Sanden als „nicht wahrnehmbar“ eingestuft. Die Staubentwicklung von Schottern und Splitten wird als „schwach“ bewertet [VDI99].

Die höchste Staubungsneigung weist die Materialprobe aus Tagebau RWTH-3 auf. Diese Probe wurde am Messpunkt einer Verladestelle entnommen. Die Messwerte spiegeln weder im Vergleich zu weiteren Messpunkten im Tagebau RWTH-3 noch im Vergleich zu den anderen Tagebauen höhere Emissionen wider. Die Probe mit der geringsten Staubungsneigung wurde nach dem Siebvorgang in Tagebau RWTH-12 entnommen. Hier treten im Vergleich jedoch sehr hohe Feinstaubkonzentrationen auf. Bei den Laborergebnissen ist zu berücksichtigen, dass sie nur den Staubaustag bei Fallvorgängen quantifizieren. Die mechanische Beanspruchung des Materials bei den zahlreichen Aufbereitungsschritten bedingt ein stärkeres Staubungsverhalten. Die Emissionshöhe ist somit nicht allein auf die Eigenschaften des Materials zurückzuführen. Vielmehr steht sie in direktem Zusammenhang mit der Art und Intensität der mechanischen Beanspruchung des Materials bei Zerkleinerungs- und Aufbereitungsprozessen.

## **3.7 Typisierung und Maßnahmen zur Emissionsminderung**

Die Messungen belegen, dass es durch Tagebauanlagen zu erheblichen Feinstaubkonzentrationen kommt, sie zeigen aber auch, dass Schutzmaßnahmen diese senken können. Mittels einer Generalisierung wurden vier Typen von Tagebauen herausgestellt. Kriterien zur Typisierung waren die Art des Abbaus (Locker- oder Festgesteinstagebau), ferner die Anzahl und Komplexität der Aufbereitungsanlagen sowie das Vorhandensein und die Art von Staubschutzmaßnahmen. Die Generalisierung beinhaltet eine Bewertung für den gezielten Einsatz notwendiger sowie gegebenenfalls auf ihre Notwendigkeit zu prüfende Minderungsmaßnahmen (siehe Anhang VI).

Bei den Typen eins bis drei handelt es sich um Lockergesteinstagebaue. Hier sind deutliche Unterschiede in der Betriebsführung und in der Komplexität der Aufbereitung festzustellen. Typ 1 stellt die Trockene Abgrabung mit einfacher Aufbereitung dar und wird von den Tagebauen RWTH-6 und RWTH-7 repräsentiert. Typ 2 und Typ 3 umfassen Betriebe mit mehrstufiger Aufbereitung. Typ 2 hat hier aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der Gewinnung um eine Nassabgrabung handelt, ein Alleinstellungsmerkmal, repräsentiert wird er von Tagebau RWTH-1. In der Praxis kommt diese Form der Abgrabung wesentlich häufiger vor, als die Trockenabgrabung. Typ 3 wird von den Betrieben RWTH-2 und RWTH-8 repräsentiert, es handelt sich um Lockergesteinsbetriebe im Trockenabbau mit mehrstufiger Aufbereitung, bei ihnen werden bereits einige Maßnahmen zur Staubreduzierung eingesetzt.

Die Untersuchungsbetriebe für den Festgesteinstagebau weisen mehrheitlich die gleichen innerbetrieblichen Strukturen und untersuchten Aufbereitungsanlagen auf. Sie bilden zusammen den Typ 4.

### **3.7.1 Typ 1: Trockenabgrabung mit einfacher Aufbereitung**

Die Tagebaue RWTH-6 und RWTH-7 stellen nur gering technisierte Betriebe dar. Das Lockergestein wird mittels Radlader abgegraben und zu einer mobilen Siebanlage transportiert. Kiese und Sande werden auf die Siebanlage aufgegeben, die durch starkes Vibrieren und Rütteln die gewünschten Kornklassen voneinander trennt. Bei diesem Verfahren wird auch anhaftendes Feinmaterial freigesetzt, wodurch Feinstaubemissionen entstehen. Aufgrund des Einsatzes von mobilen Siebanlagen und das erforderliche häufige Umsetzen in diesen Betrieben, sind technische Maßnahmen wie eine Einhausung hier nicht praktikabel.

Das Material wird nach der Klassierung auf Halden gelagert und direkt vor Ort vom Radlader auf den LKW geladen. Eine Lagerung in Silos mit entsprechenden Verladeeinrichtungen und Bandübergaben findet nicht statt. Diese Betriebsart führt zu einem hohen Verkehrsaufkommen im Tagebau. An Fahrwegen entstehen hier auch die höchsten Emissionen. Insbesondere die noch unbeladenen LKW verursachen auf-

grund erhöhter Geschwindigkeiten hohe Emissionen. Maßnahmen zur Emissionsminderung sollten in diesen Betrieben daher unbedingt an Fahrwegen getroffen werden.

Notwendig ist eine regelmäßige Bewässerung der Fahrwege bei trockener Witterung. Darüber hinaus sind die einfahrenden Produktabnehmer auf die (bestehende) Geschwindigkeitsbegrenzung hinzuweisen. In den meisten Fällen ist eine Reifenwaschanlage an der Ausfahrt des Betriebsgeländes erforderlich. Beim Hineinfahren der LKW bewirkt dies bereits eine Befeuchtung der Fahrwege, beim Hinausfahren verhindert sie den Austrag des Staubes auf die öffentlichen Straßen. Eine Reifenwaschanlage in ihrer einfachsten Form besteht aus einem Durchfahrbecken und erfordert keine aufwändigen technischen Mittel oder hohe Investitionen.

Die Emissionen beim Gewinnungsvorgang können kaum beeinflusst werden. Zu den gegebenenfalls zu prüfenden Maßnahmen gehören Sprühgalerien an der Abbaukante, um Feinstaub niederzuschlagen und dessen Ausbreitung in die Umgebung zu mindern. Denkbar ist auch der Einsatz einer Nebelkanone in unmittelbarer Nähe der Siebanlage. Die Installation einer Sprühgalerie bedarf ebenso wie der Einsatz einer Nebelkanone jedoch einer kontinuierlichen Wasserversorgung und eines häufigen Ortswechsels. Da die Immissionsbelastung im Umfeld dieses Betriebs-Typs jedoch gering ist, erscheinen diese Maßnahme hier nur in Ausnahmefällen gerechtfertigt.

### **3.7.2 Typ 2: Nassabgrabung mit mehrstufiger Aufbereitung**

Die Produktionsleistung des untersuchten Betriebes RWTH-1 ist mit 600.000 t/a überdurchschnittlich hoch. Beim eigentlichen Gewinnungsvorgang von Kies und Sand im Nassabbau sind die Feinstaubkonzentrationen als unkritisch zu bewerten.

Die mehrstufige Aufbereitung zum fertigen Produkt verursacht dagegen deutliche Feinstaubemissionen. Das Material durchläuft mehrere Klassierstufen, das Überkorn wird mittels eines Brechers zerkleinert. Hier werden Feinstaubemissionen freigesetzt.

Die gesamte Aufbereitung ist von oben nach unten geschaltet, die Emissionsquellen liegen daher in Höhen von bis zu 20 Metern. Die produzierten Korngrößen werden überwiegend über Bandanlagen in Silos und/oder von Bandabwürfen auf Halden verkippt. Die Verladung erfolgt durch den Abzug aus Silos direkt auf die LKW, das Material auf Halde wird mittels Radlader auf die LKW verladen.

Üblicherweise sind an solchen Anlagen Staubabsaugungen installiert, wie auch in diesem Betrieb. Aufgrund der stark abrasiven Beanspruchung sind die Staubabzugsrohre insbesondere an Leitungsbögen verschleißanfällig. Solche Anlagen müssen daher regelmäßig gewartet und instandgesetzt werden. Dies ist infolge des komplexen Aufbaus und der mitunter schlechten Zugänglichkeit der Anlage mit Schwierigkeiten verbunden. Neben der Bedüsung interner Übergabestellen kann es gegebenenfalls sinn-

voll sein, zumindest bei windschwachen Witterungslagen zusätzlich Nebelkanonen an offenen Anlagenteilen einzusetzen.

Auch bei diesem Tagebautyp sind die durch Fahrwege verursachten Emissionen hoch. Ihnen sollte durch Befeuchtung und Kontrolle der Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung begegnet werden.

### **3.7.3 Typ 3: Trockenabgrabung mit mehrstufiger Aufbereitung**

Die Lockergesteinsbetriebe RWTH-2 und RWTH-8 repräsentieren den Typ 3 "Trockenabbau mit mehrstufiger Aufbereitung". Sie haben im Gegensatz zu Typ 1 eine besonders große Betriebsfläche von bis zu 57 Hektar und eine Produktionsleistung von 300.000 bis 600.000 Tonnen im Jahr.

Hier werden Kiese und Sande mittels Radlader abgegraben und in die mehrstufige Aufbereitung aufgegeben. Der Transport des Materials findet überwiegend über Bandanlagen statt. Es folgt die Zerkleinerung, Klassierung und Wäsche. Die Aufbereitungsanlagen sind überwiegend kompakt gebaut. Zusätzlich sind mobile Klassieranlagen im Einsatz. Die Anlagen besitzen Entstaubungsanlagen.

Die Produkthalden sind häufig durch Boxenwände getrennt, was die dichte Lagerung größerer Mengen ermöglicht. Gleichzeitig vermindert der Windschutz durch die Boxenwände Feinstaubabwehungen.

Wie bei Typ 2 sind hier Maßnahmen zur Minderung von Emissionen vorhanden, die diese aber nicht vollständig vermeiden können. Flächenhaft große Betriebe mit geringer Abbautiefe wie die des Typs 3 sind besonders anfällig für Winderosion und emittieren Feinstaub aus der frei liegenden Betriebsfläche. Es ist daher zu empfehlen, in Bereichen, in denen der Abbau vollständig oder vorübergehend eingestellt wird, die Flächen und Böschungen zu begrünen oder zu versiegeln.

Ebenso sollte auch hier die Funktionsfähigkeit vorhandener Entstaubungseinrichtungen an Anlagen sichergestellt sowie Fahrwege und Verkehrsflächen befeuchtet werden.

### **3.7.4 Typ 4: Festgesteinstagebaue**

Die Prozesskette in Festgesteinstagebauen umfasst zunächst das Bohren und Sprengen zum Lösen des Rohmaterials aus dem Gesteinsverband als ersten Gewinnungsschritt. Es folgen das Laden und Transportieren, das Vorbrechen, Nachbrechen sowie das mehrfache Klassieren. Abschließend werden die fertigen Produkte auf Halde oder in Silos gelagert. Der Unterschied zu Lockergesteinstagebauen besteht zum einen in

der notwendigen Bohr- und Sprengarbeit sowie dem grundsätzlich notwendigen mehrfachen Brechens des Materials. Dadurch entstehen tendenziell höhere Emissionen als im Lockergesteinstagebau. In allen Anlagen ist eine Entstaubungsvorrichtung installiert, die insbesondere den Staub an Siebanlagen und Nachbrechern vermindert. Aufgrund der Messergebnisse stellt sich jedoch die Frage, wie wirksam die Absaugung in Bezug auf Feinstaub ist. Die Wartung und Instandsetzung der Staubabsaugung muss in jedem Falle gewährleistet sein.

An Übergaben kommt es prozessbedingt verstärkt zu Staubemissionen, daher sind diese materialschonend auszulegen. So kann beispielsweise die Fallhöhe minimiert und die auftretende kinetische Energie durch den Einbau von Prallmatten gesenkt werden. Prinzipiell empfiehlt sich eine Übergabe in die gleiche Förderrichtung, um das Material zu schonen.

An Bandabwürfen kann die mechanische Beanspruchung des Materials durch eine automatische Verringerung der Fallhöhe gemindert werden. Technisch ist hierzu allerdings eine aufwändige und kostenintensive Konstruktion und Steuerung notwendig. In einigen Fällen kann der gleiche Effekt jedoch auch dadurch erreicht werden, indem die Halde auf Maximalkapazität bzw. -höhe gehalten wird.

Das Verladen der Produkte aus Silos stellt auch bei vorhandenen Entstaubungseinrichtungen eine Emissionsquelle dar. Neben der regelmäßigen Wartung und Instandsetzung dieser Anlagen können hier organisatorische Maßnahmen zu einer Verringerung der Emissionen beitragen. Bei kontinuierlicher Aufbereitung, aber deutlich diskontinuierlicher Abnahme der Produkte, kommt es zur Überfüllung der Silos, die in Folge dessen teilentleert werden müssen. Wie beim regulären Abzug entsteht beim Leerfahren der Silos Feinstaub. Zusätzlich entstehen Emissionen durch das Auslagern auf Halden und das Beladen der LKW mit dem Radlader. Eine Optimierung der Logistik kann die Anzahl der Zwangslagen minimieren, indem die LKW der Abnehmer so disponiert werden, dass der Füllstand der Silos gehalten werden kann. Allerdings legt schon eine effektive d.h. wirtschaftliche Betriebsführung diese Vorgehensweise nahe.

Minderungsmaßnahmen sind in Festgesteinstagebauten in jedem Falle notwendig. Schutzmaßnahmen an Brechern wirken sich grundsätzlich positiv aus und sollten überall getroffen werden, wenn dies möglich ist.

Einhausungen an Bandanlagen umschließen diese in der Regel vollständig. In der Praxis gibt es jedoch betriebsbedingt immer wieder offene Abschnitte, an denen Feinstaub konzentriert austritt und die Schutzmaßnahme als solche weitgehend unwirksam macht. Es ist daher unbedingt sicherzustellen, dass vorübergehend geöffnete Bauteile der Einhausung schnellstmöglich wieder geschlossen werden. An Stellen, wo keine fortlaufende Einhausung möglich ist, sollten ergänzende Maßnahmen ergriffen werden. Je nach Anlagenaufbau kann dies durch Lamellenvorhänge, Wasserberieselung oder Nebelkanonen erfolgen.

Insbesondere an den Aufbereitungsanlagen herrscht ein hohes Verkehrsaufkommen, da sich dort auch die Silos für die Verladung der Endprodukte befinden. Hier kommt es

insgesamt auf engem Raum zu hohen, sich überlagernden Emissionen der verschiedenen Feinstaubquellen. Die Messungen wie Ausbreitungsrechnungen weisen diese Bereiche dementsprechend als besonders belastet aus. Hier sollten daher alle unter ökonomischen und technischen Gesichtspunkten mögliche Minderungsmaßnahmen getroffen werden. Auch die Befeuchtung der Fahrwege und Verkehrsflächen sollte zumindest in diesem Bereich erfolgen.

## 4. Fazit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnten die maßgeblichen Feinstaubemittenten im Tagebau ermittelt und die von ihnen ausgehende Feinstaubbelastung quantifiziert werden. Die hauptsächlichen Emissionen gehen von Aufbereitungsanlagen wie Brechern und Sieben aus, ferner von Übergabe- und Verladestellen. Darüber hinaus stellen Fahrwege eine bedeutende Feinstaubquelle dar.

Nicht alle Feinstaubemittenten im Tagebau konnten messtechnisch erfasst werden. Aufgrund der zeitlich begrenzten Messkampagnen wurden vorrangig die Emissionen der signifikanten Emittenten ermittelt. Messungen sollten daher für künftige Untersuchungen längere Zeiträume umfassen und weniger starke Emittenten einbeziehen. Dies gilt auch in Bezug auf die messtechnische Erfassung während witterungsbedingt emissionsschwacher Zeiträume.

In der Praxis wurden potentielle Feinstaubemittenten für Messungen ausgeschlossen, wenn die von ihnen ausgehenden Emissionen zu diffus waren um sie zu quantifizieren, dies betrifft insbesondere die Emissionen aus der freiliegenden Tagebaufläche.

Die der Untersuchung zugrunde liegenden Ergebnisse sind aus diesen Gründen als Stichproben zur Ermittlung von Anhaltswerten zu betrachten. Es sollten zukünftig weitere praktische Lösungen zur Erfassung diffuser Emissionen sowie zur Ermittlung von Emissionsraten erarbeitet werden.

Es wurde nachgewiesen, dass Festgesteinstagebaue ein höheres Emissionspotential haben als Lockergesteinstagebaue. Die Ursache hierfür ist die prozessbedingte stärkere mechanische Zerkleinerung und Beanspruchung des Wertminerals und die größere Anzahl der Aufbereitungsschritte. Dies stützen die Ergebnisse der Untersuchungen des Staubungsverhaltens von Materialproben aus den Betrieben. Unter Laborbedingungen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Staubungsneigung. Dagegen konnten große Unterschiede der Emissionshöhen bei einzelnen Prozessschritten festgestellt werden, die offenkundig nicht allein auf die Materialeigenschaft zurückzuführen sind.

Die durch Messungen ermittelten Immissionskonzentrationen zeigen, dass die Feinstaubbelastung im Umfeld der Tagebaue gering ist. Grenzwertüberschreitungen im Nahbereich der Betriebe aufgrund einer erhöhten Zusatzbelastung konnten im Rahmen der Untersuchungen nur für vier Messtage festgestellt werden. Der Wirkungsbereich der Feinstaubquellen ist demnach im Wesentlichen auf das Betriebsgelände beschränkt. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch dieses Ergebnis aufgrund der kurzen Messzeiträume statistisch gesehen nicht gesichert ist. Langzeitmessungen können eine wesentlich aussagekräftigere Datenbasis liefern.

Topographische sowie meteorologische Parameter beeinflussen die Feinstaubkonzentration und -verteilung erheblich. Sowohl die Ausbreitungsrechnungen als auch die Immissionsmessungen legen dar, in welchem Maße sich diese Faktoren auf das Verhältnis von Emission zu Immission auswirken. Es zeigte sich, dass hohe Emissionen innerhalb eines Tagebaus nicht gleichbedeutend sind mit einem großen Wirkungsbe-



reich auf dessen Umfeld. Dies ist insbesondere bei großen Betriebsflächen der Fall, in denen die Hauptemittenten windexponiert gelegen sind und die tieferliegende Gewinnungsfläche mit steilen Hängen eine Barriere für den Staubaustrag bildet. Es findet so eine Verdünnung der Feinstaubkonzentrationen statt und die Ausbreitung in das Umfeld des Tagebaus wird vermindert.

Darüber hinaus wirken sich die räumliche Nähe der Emittenten zueinander sowie die Höhe der Emissionsquelle über dem Boden auf die Feinstaubkonzentrationen aus. Emissionsquellen in größerer Höhe verursachen eine geringere Feinstaubbelastung als solche in Bodennähe.

Anhand der Charakteristika der Untersuchungsbetriebe und einer Bewertung der Notwendigkeit, Minderungsmaßnahmen einzusetzen, wurde eine Typisierung durchgeführt. Diese bildete die Grundlage für die Aufstellung eines Maßnahmenkataloges. Dieser enthält spezifische zu treffende Maßnahmen für jeden Tagebau-Typen und erlaubt eine schnelle Beurteilung über die Notwendigkeit der Ergreifung konkreter Schutzmaßnahmen im Betrieb. Zusätzlich wurden Vorschläge für darüber hinaus gehende, empfehlenswerte Maßnahmen zusammengestellt, die im Einzelfall geprüft werden sollten. Dessen Umsetzung kann einen bedeutenden Beitrag zur Umweltentlastung liefern.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnten grundlegende Fragestellungen zum Einfluss der rohstoffgewinnenden Industrie auf ihr Umfeld beantwortet werden. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse werden weitergehende Untersuchungen auf Grundlage umfangreicherer Daten dennoch als sinnvoll erachtet.

## Literaturverzeichnis

- [ARG09] Argusoft GmbH & Co. KG: *Benutzerhandbuch für AUSTAL View*.  
[http://www.argusoft.de/doc/Austal\\_Odor\\_View-Kurzbeschreibung.pdf](http://www.argusoft.de/doc/Austal_Odor_View-Kurzbeschreibung.pdf)  
Datum: 17.07.2009.
- [ASP07] Verein zur Förderung agrar- und stadtoökologischer Projekte e.V.: *Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen*. Forschungsprojekt Nr. 06HS021. Berlin 2007.
- [Blm10] 39. BImSchV: *Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen)*.  
<http://www.bmu.de/luftreinhaltung/downloads/doc/44556.php>  
Datum: 12.09.2010.
- [BMU02] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutz-Gesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 24.Juli 2002*.  
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf>  
Datum: 15.06.2008.
- [BRU08] BRUCKMANN, P.: *Die novellierte Richtlinie über Luftqualität der Europäischen Union - neue Elemente und Anforderungen*. In: *Immissionsschutz 2/08* (2008), S. 60-67.
- [CC02] Chakraborty, M.K., Ahmad, M., Pal, D., Bandopadhyay, C. & S.K. Chaulya (2002): *Determination of the emission rate from various open-cast mining operations*. In: *Environmental Modelling & Software 17* (2002); S. 467-480.
- [GAL08] GALK, Arbeitskreis Stadtbäume: *Positionspapier Feinstaub*. Stand Juni 2008.  
[http://www.galk.de/projekte/pr\\_down/pospapier\\_feinstaub\\_akstb0806langfass.pdf](http://www.galk.de/projekte/pr_down/pospapier_feinstaub_akstb0806langfass.pdf)  
Datum: 20.06.2011.
- [GH07] Grabowski, H.-G. & U. Hartmann: *Bewertung von Schwebstaub in Steinbrüchen*. In: *MIRO 6/2007*, S. 16-18.

- [IGF11] Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie an der Ruhr Universität Bochum (IGF): *Bericht über die Untersuchung von 12 Materialproben zur Beurteilung des Staubungsverhaltens gemäß DIN 33897, Teil 2 „Kontinuierlicher Fall im Gegenstrom“ und EN 15051, Methode B „Continuous drop“*. Ergebnisbericht, Bochum, 2011.
- [JJ04] Janicke, U. & L. Janicke: *Weiterentwicklung eines diagnostischen Windfeldmodells für den anlagenbezogenen Immissionsschutz (TA Luft)*. Ingenieurbüro Janicke im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dunum 2004.
- [KRL07] Kommission Reinhaltung der Luft: *Luftbeschaffenheit – Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht*. Deutsche Fassung EN 15259:2007.
- [PRE96] Pregger, T.: *Ermittlung und Analyse der Emissionen und Potenziale zur Minderung primärer anthropogener Feinstäube in Deutschland*. Dissertation 2006.
- [UBA09] Umweltbundesamt: *Entwicklung der Luftqualität in Deutschland*. Hintergrundpapier. Oktober 2009.  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3760.pdf>  
 Datum: 14.02.2010.
- [VDI03] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3970, Blatt 1. Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen - Grundlagen*. Berlin 2003.
- [VDI00] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3945, Blatt 3. Umweltmeteorologie. Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell*. Berlin 2000.
- [VDI99]: Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3790, Blatt 3. Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen: Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern*. Berlin 1999.
- [WES04] Wesseling, J.P., Duyzer, J., Tonneijck, A.E.G., van Dijk, C.J.: *Effecten van groenelementen op NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub>-concentraties in de buitenlucht*. TNO-Raport R 2004/383, September 2004.

# Anhang I Messwerte

RWTH-1

Fahrwege		Brecher		Siebe		Übergaben / Bänder		Schwertwäsche		Verladung		Immissionen		Nasssiebung	
246,0	x11	686,9	x9	687,0	x7	119,5	x6	503,6	x12	246	x11	24,1	x1	14,3	x10
274,7	x11	439,2	x9	361,2	x7	66,1	x6	344,3	x12	274,7	x11	15,3	x1	40,9	x10
248,1	x11	372,0	x9	242,6	x7	82,5	x6	356,7	x12	248,1	x11	30,2	x2	27,2	x10
134,2	x11	337,1	x9	203,7	x7	70,4	x6	925,7	x12	134,2	x11	12,3	x3	52,3	x10
		587,5	x8	191,2	x7	47,1	x6					35,3	x3	37,9	x10
		781,9	x8	61,6	x7	496,2	x6					10,8	x4	13,2	x10
		270,4	x8	130,3	x7	346,7	x6					14,5	x5	34,9	x10
		597,8	x8	195,6	x7	116,1	x6					17,9	x13	59,5	x10
		260,4				248,5	x6					16,3	x13		
						412,2	x6					8,2	x14		
						423,5	x6					11,5	x14		
						72,1	x6					28	x14		
						67,0	x6					13	x15		
												35,7	x15		
												57,5	x4		

RWTH-2

Fahrwege		Siebe		Übergaben / Bänder		Verladung / Silo		Immissionen					
53,3	x6	313,9	x11	29,2	x1	30,1	x2	31,2	x4	131,2	x8	20,5	x14
106,0	x6	55,3	x11	250,5	x1	121,1	x2	32,5	x4	30,1	x8	8,5	x14
278,0	x6	95,8	x11	250,5	x1	146,7	x2	57,5	x4	19,9	x10	22,4	x14
		43,3	x11	37,9	x1	98,5	x2	69,0	x4	22,6	x10	18,0	x15
				705,7	x1	195,5	x2	113,9	x4	102,8	x10	87,5	x5
				22,8	x3	70,2	x2	16,5	x7	20,5	x10	24,4	x5
				14,7	x3	49,2	x2	17,3	x7	109,0	x12	14,0	x5
				37,5	x3	134,4	x2	51,1	x8	30,0	x12	8,7	x5
						264,3	x9	43,3	x8	20,4	x13	18,9	x5
						251,3	x9			76,5	x13		
						119,7	x9						
						115,5	x9						

## Messwerte [2]

### RWTH-3

<b>Fahrwege</b>		<b>Brecher</b>		<b>Übergaben / Bänder</b>		<b>Verladung</b>		<b>Halde</b>		<b>Sprengung</b>		<b>Immissionen</b>	
133,3	x14	1.057,1	x6	469,3	x3	236,8	x4	457,0	x11	561,1	x5	14,1	x2
461,1	x14	1.123,2	x6	529,4	x3	185,1	x4	197,1	x11			32,4	x2
471,1	x12			487,5	x3	2.308,1	x1	60,5	x9			9,1	x8
802,1	x12					105,5	x1	37,1	x9			13,9	x8
						906,2	x1	131,0	x9			15,4	x10
						1.179,1	x1					37,3	x10
						155,1	x7					109,3	x10
						495,3	x7					28,9	x13
												24,5	x13

### RWTH-4

<b>Fahrwege</b>		<b>Brecher</b>		<b>Siebe</b>		<b>Übergaben / Bänder</b>		<b>Verladung</b>		<b>Immissionen</b>			
449,1	x5	2.013,4	x7	3.077,1	x8	28.352,3	x3	5.562,2	x4	59,1	x1	19,4	x2
112,4	x5	5.406,1	x7	15.969,4	x8	5.535,5	x3	612,1	x4	16,7	x1	12,7	x2
		1.262,1	x9							35,1	x1	24,6	x11
		4.211,2	x9									22,7	x2
								<b>Abbau</b>		22,7	x2	28,3	x11
								152,1	x6	34,1	x2	40,8	x10
												59,8	x10

### RWTH-5

<b>Fahrwege</b>		<b>Brecher</b>		<b>Übergaben / Bänder</b>			<b>Verladung</b>		<b>Immissionen</b>				
114,1	x2	134,1	x3	2.619,1	x6	847,4	x11	2.390,1	x9	6,5	x1	48,4	x10
175,1	x2	107,1	x3	2.843,1	x6	2.257,3	x11	643,1	x9	44,1	x1	19,1	x10
134,1	x4	5.064,1	x5	1.297,4	x7c	4.162,3	x12			33,3	x8	36,0	x13
28,3	x4	3.849,1	x5	917,1	x7c					16,3	x8	57,0	x14

# Messwerte [3]

## RWTH-6

<i>Fahrwege</i>		<i>Siebe</i>		<i>Abbau</i>		<i>Immissionen</i>			
260,1	x2	76,3	x1	85,5	x12	42,5	x3	39,0	x9
281,1	x2	295,5	x1	60,5	x12	8,5	x3	44,0	x9
181,3	x2	214,8	x1	69,1	x12	47,3	x5	27,7	x10
201,1	x4	419,2	x1			23,5	x8	24,9	x10
1.222,1	x4	11,1	x6			34,2	x7	8,9	x11
		310,4	x6			27,4	x7	42,3	x11
		419,0	x6			24,3	x8	37,7	x11

## RWTH-7

<i>Fahrwege</i>		<i>Siebe</i>		<i>Immissionen</i>			
3.373,8	x3	107,1	x2	64,1	x1	181,3	x6
99,4	x3	232,9	x2	58,1	x1	47,4	x7
162,4	x3	215,1	x2	46,2	x5	43,1	x7
324,1	x3	107,1	x2	73,1	x5	43,8	x8
134,0	x3	196,3	x2	24,3	x5	18,8	x8
92,8	x4			25,1	x6	33,3	x8
116,9	x4			151,3	x6	31,4	x8
305,1	x4						

## RWTH-8

<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>				<i>Doseur</i>		<i>Schwertwäsche</i>		<i>Immissionen</i>	
119,3	x6	129,8	x10	264,8	x4	42,5	x2	143,7	x5	26,1	x3	115,6	x11	602,9	x1
93,5	x6	151,7	x10	14,2	x8	118,3	x2	137,5	x5	44,7	x3	33,3	x11	20,2	x1
99,0	x6	530,5	x10	45,6	x8	156,0	x2	41,6	x7	27,9	x3	116,2	x11	50,8	x1
234,1	x6	225,6	x10	156,2	x8	643,2	x2	116,9	x7	22,2	x3	187,7	x11	33,5	x1
392,0	x15			403,2	x8	3.343,3	x2	130,3	x7			354,9	x11	9,2	x12
197,1	x15			176,6	x8	137,5	x5	2.456,9	x7					6,2	x12
				146,2	x9									17,5	x13
				153,1	x9									21,7	x14
				246,4	x9										



Messwerte [5]

RWTH-11

<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>		<i>Abbau</i>		<i>Immissionen</i>			
78,1	x2	1.405,1	x3	1.783,3	x8	749,0	x9	42,1	x1	43,1	x4
560,6	x2	22.594,0	x3	310,4	x8			37,4	x1	56,0	x6
321,2	x2	1.056,0	x3					25,1	x4	55,1	x7
		5.153,1	x5							57,1	x7
		9.989,2	x5								

RWTH-12

<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Abbau</i>		<i>Bohren</i>		<i>Immissionen</i>			
128,5	x1	458,4	x3	542,3	x2	230,2	x4	9.981,3	x5	40,3	x6	120	x9
		1.046,3	x3	657,7	x2	1.301,1	x4			56,8	x7	79,3	x10
		1.949,8	x3	2.527,1	x2	217,1	x4			13,9	x8	28	x12
		3.163,6	x3	5.038,9	x2	179,2	x11					27,2	x13
		7.285,8	x3	11.164,4	x2								
		14.649,7	x3	15.411,4	x2								



## Anhang II Emissionsraten

Übersicht der berechneten mittleren Emissionsraten (g/s) im gesamten Messzeitraum nach Kategorie und Messpunkt [1]

RWTH-1	Fahrwege		Brecher		Siebe		Übergaben / Bänder		Schwertwäsche		Verladung		Nasssiebung	
	0,004	x11	0,01	x9	0,007	x7	0,003	x6	0,01	x12	0,004	x11	0,001	x10
		0,006	x8											

RWTH-2	Fahrwege		Siebe		Übergaben / Bänder		Verladung / Silo	
	0,003	x6	0,004	x11	0,002	x1	0,001	x2
				0,001	x3	0,005	x9	

RWTH-3	Fahrwege		Brecher		Übergaben / Bänder		Verladung		Halde	
	0,01	x14	0,02	x6	0,004	x3	0,004	x4	0,012	x11
	0,02	x12					0,04	x1	0,002	x9
						0,006	x7			

RWTH-4	Fahrwege		Brecher		Siebe		Übergaben / Bänder		Verladung		Abbau	
	0,006	x5	0,07	x7	0,07	x8	0,07	x3	0,030	x4	0,008	x6
		0,040	x9									

RWTH-5	Fahrwege		Brecher		Übergaben / Bänder		Verladung	
	0,003	x2	0,002	x3	0,032	x6	0,03	x9
	0,003	x4	0,08	x5	0,016	x7		
					0,035	x11		
				0,08	x12			

RWTH-6	Fahrwege		Siebe		Abbau	
	0,008	x2	0,036	x1	0,005	x12
	0,02	x4	0,035	x6		

Übersicht der berechneten mittleren Emissionsraten (g/s) im gesamten Messzeitraum nach Kategorie und Messpunkt [2]

<b>RWTH-7</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Siebe</i>	
	0,03	x3	0,11	x2
	0,018	x4		

<b>RWTH-8</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>		<i>Doseur</i>		<i>Schwertwäsche</i>	
	0,002	x6	0,037	x10	0,017	x4	0,001	x2	0,0004	x3	0,003	x11
	0,005	x15			0,003	x8	0,002	x5				
				0,002	x9	0,025	x7					

<b>RWTH-9</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>	
	0,009	x2	0,09	x7	0,006	x8	0,036	x12
	0,036	x13			0,04	x9		
					0,015	x10		
				0,04	x11			

<b>RWTH-10</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>		<i>Verladung</i>		<i>Abbau</i>	
	0,005	11+12	0,07	x6	0,013	x8	0,004	x3	0,002	x2	0,006	x13
	0,01	x1	0,050	x7			0,003	x9	0,015	x5		
						0,007	x4					

<b>RWTH-11</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Übergaben / Bänder</i>		<i>Abbau</i>	
	0,006	x2	0,08	x3	0,09	x8	0,01	x9
	0,006	x7a	0,06	x5				

<b>RWTH-12</b>	<i>Fahrwege</i>		<i>Brecher</i>		<i>Siebe</i>		<i>Abbau</i>		<i>Bohren</i>	
	0,002	x1	0,025	x3	0,042	x2	0,008	x4	0,15	x5
						0,004	x11			

## Anhang III

## Ergebnisse zum Staubungsverhalten

Probenbezeichnung		RWTH-1	RWTH-2	RWTH-3
Schüttdichte		1,41 g/cm <sup>3</sup>	0,97 g/cm <sup>3</sup>	1,27 g/cm <sup>3</sup>
Gutfeuchte		0,48 M.-%	4,59 M.-%	0,28 M.-%
Anzahl der Messungen		3	3	3
Messdauer (min)		je 30	je 30	je 30
Gesamte Fallmasse (g)		898	865	899
Entwicklung von alveolengängigem Staub	A-Staub-Werte S <sub>A</sub> (mg/kg)	0,17 (<NG)* 0,24 (<NG) 0,17 (<NG)	0,28 (<NG) 0,42 (<BG)** 0,28 (<NG)	0,34 (<NG) 0,54 (<BG) 0,31 (<NG)
	Mittlerer A-Staubwert S <sub>A</sub> DIN 33987-2	< 0,20	< 0,33	< 0,4
	rel. Standard- abweichung	16,5 %	20 %	25,6 %
	A-Staubwert W <sub>R</sub> (S <sub>A</sub> x 26,5) EN 15051- B	<b>5,3 mg/kg</b>	<b>8,75 mg/kg</b>	<b>10,6 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm	staubarm
Entwicklung von einatembarem Staub	E-Staub-Werte S <sub>E</sub> (mg/kg)	12,4 11,3 12,3	1,93 (<NG) 1,37 (<NG) 2,76 (<NG)	8,02 (<BG) 8,75 (<BG) 9,99 (<BG)
	Mittlerer E-Staubwert S <sub>E</sub> DIN 33987-2	12	< 2,02	< 8,92
	rel. Standard- abweichung	4,14 %	28,3 %	9,12 %
	E-Staubwert W <sub>I</sub> (S <sub>E</sub> x 26,5) EN 15051-B	<b>318 mg/kg</b>	<b>53,6 mg/kg</b>	<b>237 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	gering staubend	staubarm	staubarm

\*NG = Nachweisgrenze

\*\*BG = Bestimmungsgrenze

Probenbezeichnung		RWTH-4	RWTH-5	RWTH-6
Schüttdichte		0,76 g/cm <sup>3</sup>	1,23 g/cm <sup>3</sup>	1,18 g/cm <sup>3</sup>
Gutfeuchte		23,63 M.-%	3,08 M.-%	4,19 M.-%
Anzahl der Messungen		3	3	3
Messdauer (min)		je 30	je 30	je 30
Gesamte Fallmasse (g)		837	893	883
Entwicklung von alveolengängigem Staub	A-Staub-Werte S <sub>A</sub> (mg/kg)	0 (<NG)* 0,29 (<NG) 0,29 (<NG)	0,14 (<NG) 0,17 (<NG) 0,11 (<NG)	0,24 (<NG) 0,11 (<NG) 0,21 (<NG)
	Mittlerer A-Staubwert S <sub>A</sub> DIN 33987-2	< 0,19	< 0,14	< 0,19
	rel. Standard- abweichung	70,8 %	17,5 %	29,3 %
	A-Staubwert W <sub>R</sub> (S <sub>A</sub> x 26,5) EN 15051- B	<b>5,04 mg/kg</b>	<b>3,71 mg/kg</b>	<b>5,04 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm	staubarm
Entwicklung von einatembarem Staub	E-Staub-Werte S <sub>E</sub> (mg/kg)	2,73 (<NG) 3,27 (<NG) 3,21 (<NG)	3,4 (<NG) 3 (<BG)** 2,86 (<NG)	3,34 (<NG) 2,6 (<NG) 2,5 (<NG)
	Mittlerer E-Staubwert S <sub>E</sub> DIN 33987-2	< 3,07	< 3,09	< 2,82
	rel. Standard- abweichung	7,88 %	7,41 %	13,3 %
	E-Staubwert W <sub>I</sub> (S <sub>E</sub> x 26,5) EN 15051-B	<b>81,4 mg/kg</b>	<b>81,9 mg/kg</b>	<b>74,8 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm	staubarm

\*NG = Nachweisgrenze

\*\*BG = Bestimmungsgrenze

## Ergebnisse zum Staubungsverhalten [2]

Probenbezeichnung		RWTH-7	RWTH-9	RWTH-10
Schüttdichte		1,47 g/cm <sup>3</sup>	1,28 g/cm <sup>3</sup>	1,30 g/cm <sup>3</sup>
Gutfeuchte		6,92 M.-%	3,46 M.-%	11,09 M.-%
Anzahl der Messungen		3	3	3
Messdauer (min)		je 30	je 30	je 30
Gesamte Fallmasse (g)		889	896	892
Entwicklung von alveolengängigem Staub	A-Staub-Werte S <sub>A</sub> (mg/kg)	0,24 (<NG)* 0,17 (<NG) 0,17 (<NG)	0,34 (<NG) 0,24 (<NG) 0,07 (<NG)	0,24 (<NG) 0,17 (<NG) 0,38 (<BG)
	Mittlerer A-Staubwert S <sub>A</sub> DIN 33987-2	< 0,2	< 0,22	< 0,27
	rel. Standard- abweichung	16,5 %	50,7 %	32,4 %
	A-Staubwert W <sub>R</sub> (S <sub>A</sub> x 26,5) EN 15051- B	<b>5,3 mg/kg</b>	<b>5,83 mg/kg</b>	<b>7,16 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm	staubarm
Entwicklung von einatembarem Staub	E-Staub-Werte S <sub>E</sub> (mg/kg)	3,48 (<BG)** 1,58 (<NG) 1,56 (<NG)	0,88 (<NG) 0,44 (<NG) 0,71 (<NG)	5,34 (<BG) 4,72 (<BG) 4,46 (<BG)
	Mittlerer E-Staubwert S <sub>E</sub> DIN 33987-2	< 2,21	< 0,68	< 4,84
	rel. Standard- abweichung	40,8 %	26,7 %	7,63 %
	E-Staubwert W <sub>I</sub> (S <sub>E</sub> x 26,5) EN 15051-B	<b>58,6 mg/kg</b>	<b>18,8 mg/kg</b>	<b>129 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm	staubarm

\*NG = Nachweisgrenze

\*\*BG = Bestimmungsgrenze

Probenbezeichnung		RWTH-11	RWTH-12
Schüttdichte		1,42 g/cm <sup>3</sup>	1,26 g/cm <sup>3</sup>
Gutfeuchte		3,66 M.-%	9,23 M.-%
Anzahl der Messungen		3	3
Messdauer (min)		je 30	je 30
Gesamte Fallmasse (g)		895	896
Entwicklung von alveolengängigem Staub	A-Staub-Werte S <sub>A</sub> (mg/kg)	0,14 (<NG)* 0,24 (<NG) 0,14 (<NG)	0,04 (<NG) 0,14 (<NG) 0,27 (<NG)
	Mittlerer A-Staubwert S <sub>A</sub> DIN 33987-2	< 0,18	< 0,15
	rel. Standard- abweichung	26,2 %	62,8 %
	A-Staubwert W <sub>R</sub> (S <sub>A</sub> x 26,5) EN 15051- B	<b>4,77 mg/kg</b>	<b>3,98 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm
Entwicklung von einatembarem Staub	E-Staub-Werte S <sub>E</sub> (mg/kg)	6,06 (<BG)** 2,09 (<NG) 2,52 (<NG)	3,36 (<NG) 3,35 (<NG) 3,36 (<NG)
	Mittlerer E-Staubwert S <sub>E</sub> DIN 33987-2	< 3,56	< 3,36
	rel. Standard- abweichung	50 %	0,15 %
	E-Staubwert W <sub>I</sub> (S <sub>E</sub> x 26,5) EN 15051-B	<b>94,4 mg/kg</b>	<b>89,1 mg/kg</b>
	Staubungsneigung EN 15051-B	staubarm	staubarm

\*NG = Nachweisgrenze

\*\*BG = Bestimmungsgrenze

[Quelle: IGF11]

## Anhang IV Immissionskonzentrationen

Immissionswerte der Messungen und des Hintergrundes [1]

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-1	x1	24,1	13	11,1
	x1	15,3	12	3,3
	x2	30,2	12	18,2
	x2	12,3	5	7,3
	x3	35,3	12	13,3
	x4	10,8	n.v.	n.v.
	x5	14,5	5	9,5
	x13	17,9	5	12,9
	x13	16,3	5	11,3
	x14	8,2	5	3,2
	x14	11,5	5	6,5
	x14	28	5	23
	x15	13	5	8
	x15	35,7	5	30,7

RWTH-2	x4	31,2	12	19,2
	x4	32,5	5	27,5
	<b>x4</b>	<b>57,5</b>	<b>5</b>	<b>52,5</b>
	<b>x4</b>	<b>69,0</b>	<b>15</b>	<b>54</b>
	<b>x4</b>	<b>113,9</b>	<b>5</b>	<b>108,9</b>
	x7	16,5	5	11,5
	x7	17,3	5	12,3
	<b>x8</b>	<b>51,1</b>	<b>16</b>	<b>35,1</b>
	x8	43,3	19	24,3
	<b>x8</b>	<b>131,2</b>	<b>19</b>	<b>112,2</b>
	x8	30,1	17	13,1
	x10	19,9	16	3,9
	x10	22,6	19	3,6
	<b>x10</b>	<b>102,8</b>	<b>19</b>	<b>83,8</b>
	x10	20,5	17	3,5
	<b>x12</b>	<b>109,0</b>	<b>16</b>	<b>93</b>
	x12	30,0	19	11
	x13	20,4	20	
	<b>x13</b>	<b>76,5</b>	<b>14</b>	<b>62,5</b>
	x14	20,5	16	4,5
	x14	8,5	5	3,5
	x14	22,4	15	7,4
	x15	18,0	13	5
<b>x5</b>	<b>87,5</b>	<b>13</b>	<b>74,5</b>	
x5	24,4	12	12,4	
x5	14,0	5	9	
x5	8,7	5	3,7	
x5	18,9	12	6,9	

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-3	x2	14,1	41	
	x2	32,4	19	13,4
	x8	9,1	13	
	x8	13,9	18	
	<b>x10</b>	<b>109,3</b>	<b>19</b>	<b>90,3</b>
	x10	37,3	18	19,3
	<b>x10</b>	<b>109,3</b>	<b>24</b>	<b>85,3</b>
	x13	28,9	16	12,9
	x13	24,5	17	7,5

RWTH-4	<b>x1</b>	<b>59,1</b>	<b>9,2</b>	<b>49,9</b>
	x1	16,7	10,6	6,1
	x1	35,1	10,7	24,4
	x2	22,7	10,7	12
	x2	34,1	12,3	21,8
	x2	19,4	9,2	10,2
	x2	12,7	10,6	2,1
	x11	24,6	11,4	13,2
	x11	28,3	12,3	16
	x10	40,8	12,3	28,5
	<b>x10</b>	<b>59,8</b>	<b>25,8</b>	<b>34</b>

RWTH-5	x1	6,5	9,4	
	x1	44,1	17,7	26,4
	x8	33,3	15,7	17,6
	x8	16,3	8,2	8,1
	x10	48,4	10	38,4
	x10	19,1	7,4	11,7
	x13	36,0	12,9	23,1
	x14	57,0	20,1	36,9

RWTH-6	x3	42,5	18	24,5
	x3	8,5	19	
	x5	47,3	5	42,3
	x8	23,5	31	
	x7	34,2	67	
	x7	27,4	26	1,4
	x8	24,3	12	12,3
	x9	39,0	27	12
	x9	44,0	30	14
	x10	27,7	15	12,7
	x10	24,9	21	3,9
	x11	8,9	23	
	x11	42,3	31	11,3
	x11	37,7	19	18,7

[Quelle: LANUV, HLUg sowie eigene Erhebung]

Immissionswerte der Messungen und des Hintergrundes [2]

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-7	x1	<b>64,1</b>	<b>22</b>	<b>42,1</b>
	x1	<b>58,1</b>	<b>18</b>	<b>30,1</b>
	x5	46,2	11	35,2
	x5	<b>73,1</b>	<b>12</b>	<b>51,1</b>
	x5	24,3	12	12,3
	x6	25,1	12	13,1
	x6	<b>151,3</b>	<b>19</b>	<b>132,3</b>
	x6	<b>181,3</b>	<b>14</b>	<b>167,3</b>
	x7	47,4	18	29,4
	x7	43,1	14	29,1
	x8	43,8	22	21,8
	x8	18,8	15	3,8
	x8	33,3	18	15,3
	x8	31,4	24	7,4

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-8	x1	20,2	11	9,2
	x1	<b>50,8</b>	<b>16</b>	<b>34,8</b>
	x1	33,5	12	21,5
	x12	9,2	5	4,2
	x12	6,2	5	1,2
	x13	17,5	11	6,5
	x14	21,7	12	9,7

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-9	x1	<b>85,4</b>	<b>60</b>	<b>25,4</b>
	x1	<b>52,9</b>	<b>41</b>	<b>11,9</b>
	x3	27,8	14	13,8
	x3	37,1	18	19,1
	x4	10,5	18	
	x4	18,1	14	0,1
	x5	9,3	10	
	x5	47,6	17	30,6
	x5	14,8	15	0,2
	x5	37,0	13	23
	x6	10,1	10	0,1
	x6	36,4	17	21,4
	x6	40,1	17	13,1
	x6	25,7	15	8,7
x14	28,9	14	8,9	
x14	36,0	19	17	

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-10	x10	11,4	5	6,4
	x10	19,1	5	14,1
	x10	15,4	9,3	5,9
	x15	12,3	10	2,3
	x15	<b>57,1</b>	<b>20</b>	<b>37,1</b>
	x15	26,1	18	8,1
	x16	23,5	16	17,5
	x16	28,5	15	13,5
	x16	23,2	14	9,2
	x17	8,2	15	
	x17	22,8	11	11,8
	x17	9,1	5	4,1
	x18	16,7	5	11,7
	x18	38,1	26	12,1
x18	18,5	13	5,5	

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-11	x1	42,1	11,9	30,2
	x1	37,4	13,1	24,3
	x4	25,1	13,1	12
	x4	43,1	22,5	20,6
	x6	<b>56,0</b>	<b>22,5</b>	<b>33,5</b>
	x7	<b>55,1</b>	<b>22,5</b>	<b>32,6</b>
	x7	57,1	26,6	30,5

Tagebau	Messpunkt	Messwert	Hintergrund	Zusatzbelastung
RWTH-12	x6	40,3	26	14,3
	x7	<b>56,8</b>	<b>36</b>	<b>20,8</b>
	x8	13,9	17	
	x9	<b>120</b>	<b>34</b>	<b>84</b>
	x10	<b>79,3</b>	<b>28</b>	<b>61,3</b>
	x12	28	19	9
	x13	27,2	13	14,2

[Quelle: LANUV, HLUG sowie eigene Erhebung]

## Anhang V Ermittlung von Überschreitungstagen

	Messwert ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Hintergrund ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tagesmittelwert ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
RWTH-2	51,1	16,0	27,7
	<b>131,2</b>	<b>19,0</b>	<b>56,4</b>
	102,8	19,0	46,9
	109,0	16,0	47,0
	76,5	14,0	34,8
RWTH-3	109,3	19,0	49,1
	<b>109,3</b>	<b>24,0</b>	<b>52,4</b>
RWTH-4	59,1	9,2	25,8
	59,8	25,8	37,1
RWTH-7	64,1	22,0	36,0
	73,1	12,0	32,4
	<b>151,3</b>	<b>19,0</b>	<b>63,1</b>
	<b>181,3</b>	<b>14,0</b>	<b>69,8</b>
RWTH-9	<b>85,4</b>	<b>60,0</b>	<b>68,5</b>
	52,9	41,0	45,0
RWTH-10	57,1	20,0	32,4
RWTH-11	56,0	22,5	33,7
	55,1	22,5	33,4
RWTH-12	56,8	36,0	42,9
	79,3	28,0	45,1

[Quelle: LANUV, HLUG sowie eigene Erhebung]

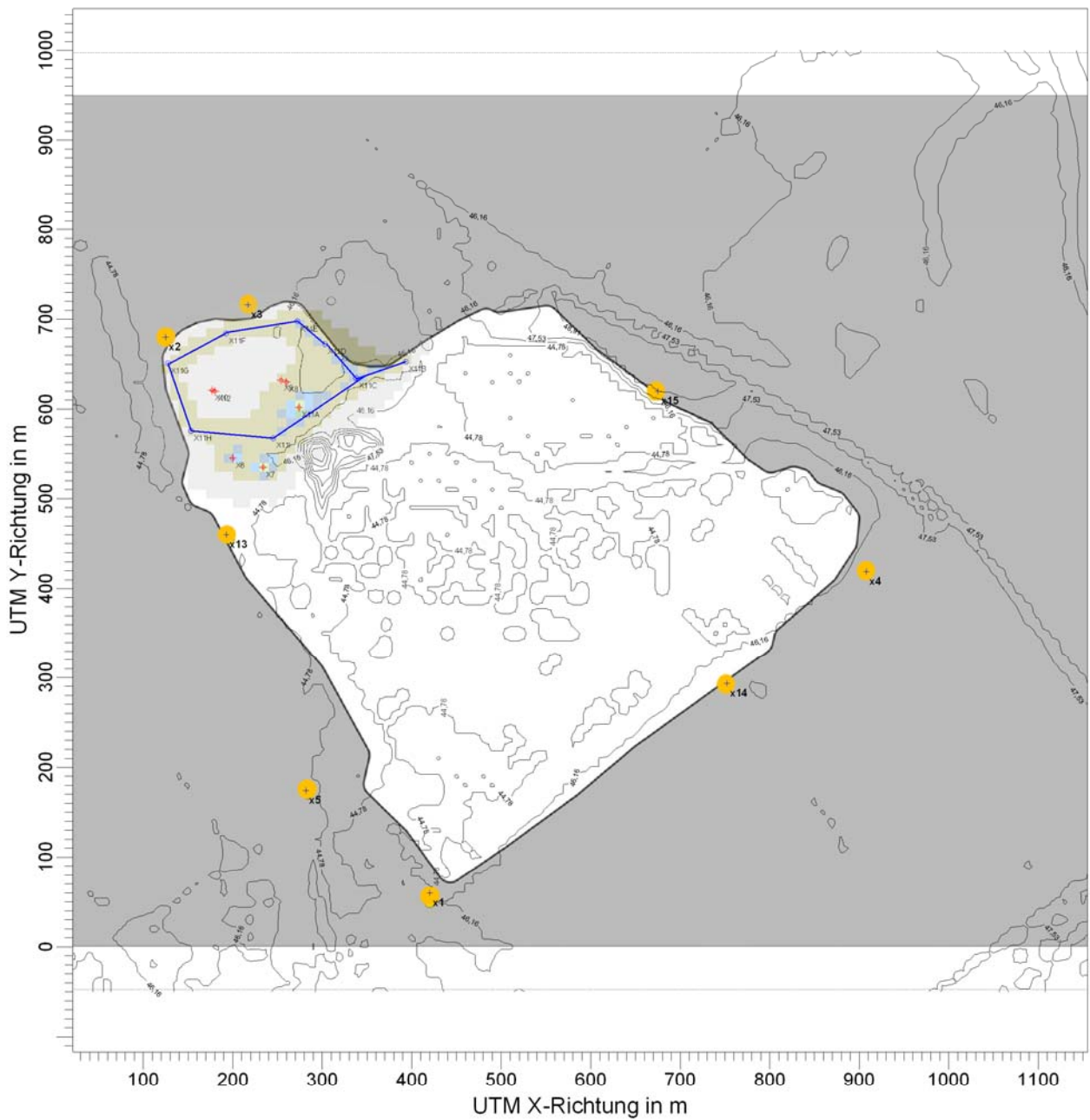
## Anhang VI Maßnahmenkatalog nach Typisierung

Typisierung			Maßnahmen	
			notwendig	ggf. zu prüfen
Lockergestein	Trockenabgrabung mit einfacher Aufbereitung	Typ 1	Bewässerung der Fahrwege und Verkehrsflächen	Einsatz einer Nebelkanone an der Siebanlage
			Reifenwaschanlage	Installation von Regnergallen am Tagebaurand
			Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung	Installation von Boxenwänden an Halden oder Lagerung in Hallen
	Nassabrabung mit mehrstufiger Aufbereitung	Typ 2	regelmäßige Wartung und Instandsetzung der Entstaubungsanlage	Öffnen von Einhausungen nur kurzfristig
			Bewässerung der Fahrwege und Verkehrsflächen	Einsatz von Nebelkanonen an dauerhaft offenen Anlagenteilen
			Reifenwaschanlage	Installation von Boxenwänden an Halden oder Lagerung in Hallen
			Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung	Materialschonende Bauweise von Bandübergaben
	Trockenabbau mit mehrstufiger Aufbereitung	Typ 3	regelmäßige Wartung und Instandsetzung der Entstaubungsanlage	Zwischenbegrünung in vollständig oder vorübergehend stillgelegten Bereichen
			Bewässerung der Fahrwege und Verkehrsflächen	Große Fallhöhen des Materials vermeiden
			Reifenwaschanlage	Materialschonende Auslegung von Bandübergaben
			Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung	Installation von Regnergallen am Tagebaurand
	Festgestein	Festgesteinstagebaue	Typ 4	Einhausung des Vorbrechers
regelmäßige Wartung und Instandsetzung der Entstaubungsanlage				Einsatz von Nebelkanonen an dauerhaft offenen Anlagenteilen
Materialschonende Auslegung von Bandübergaben				Fallhöhen des Materials vermindern
Bewässerung der Fahrwege und Verkehrsflächen				Einsatz von Nebelkanonen bei Sprengungsbohrungen
Reifenwaschanlage				Installation von Boxenwänden an Halden oder Lagerung in Hallen
Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung				Installation von Regnergallen am Tagebaurand



## **Anhang VII Immissionskataster**


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-1 Lockergesteinstagenau - Nassabgrabung



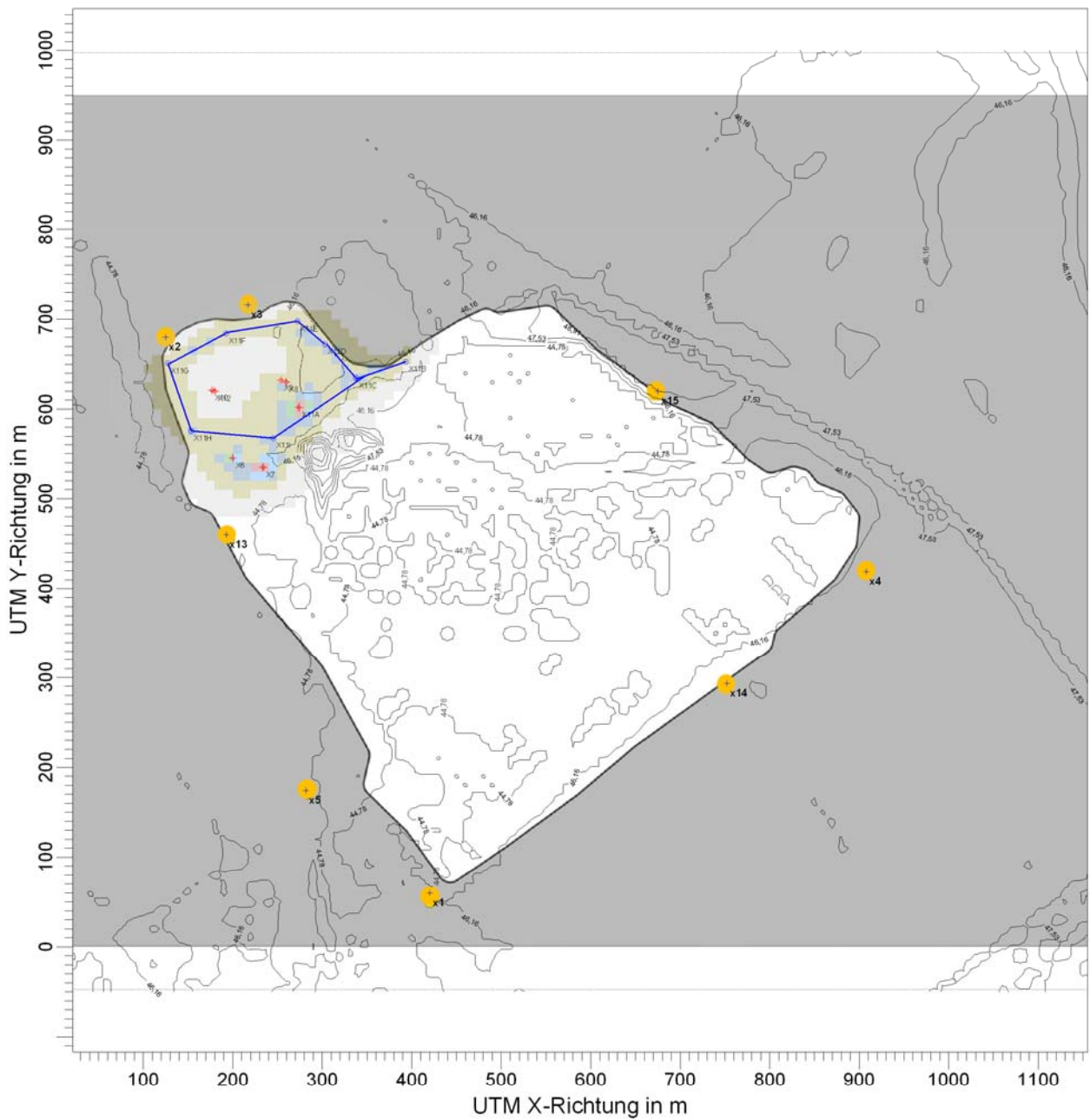
PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 265.000 m <sup>2</sup> 600.000 t/a 3.130 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 39,7	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 15		<b>MAßSTAB:</b> 1:7.327 0  0,2 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00			<b>PROJEKT-NR.:</b>


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-1 Lockergesteinstagebau - Nassabgrabung



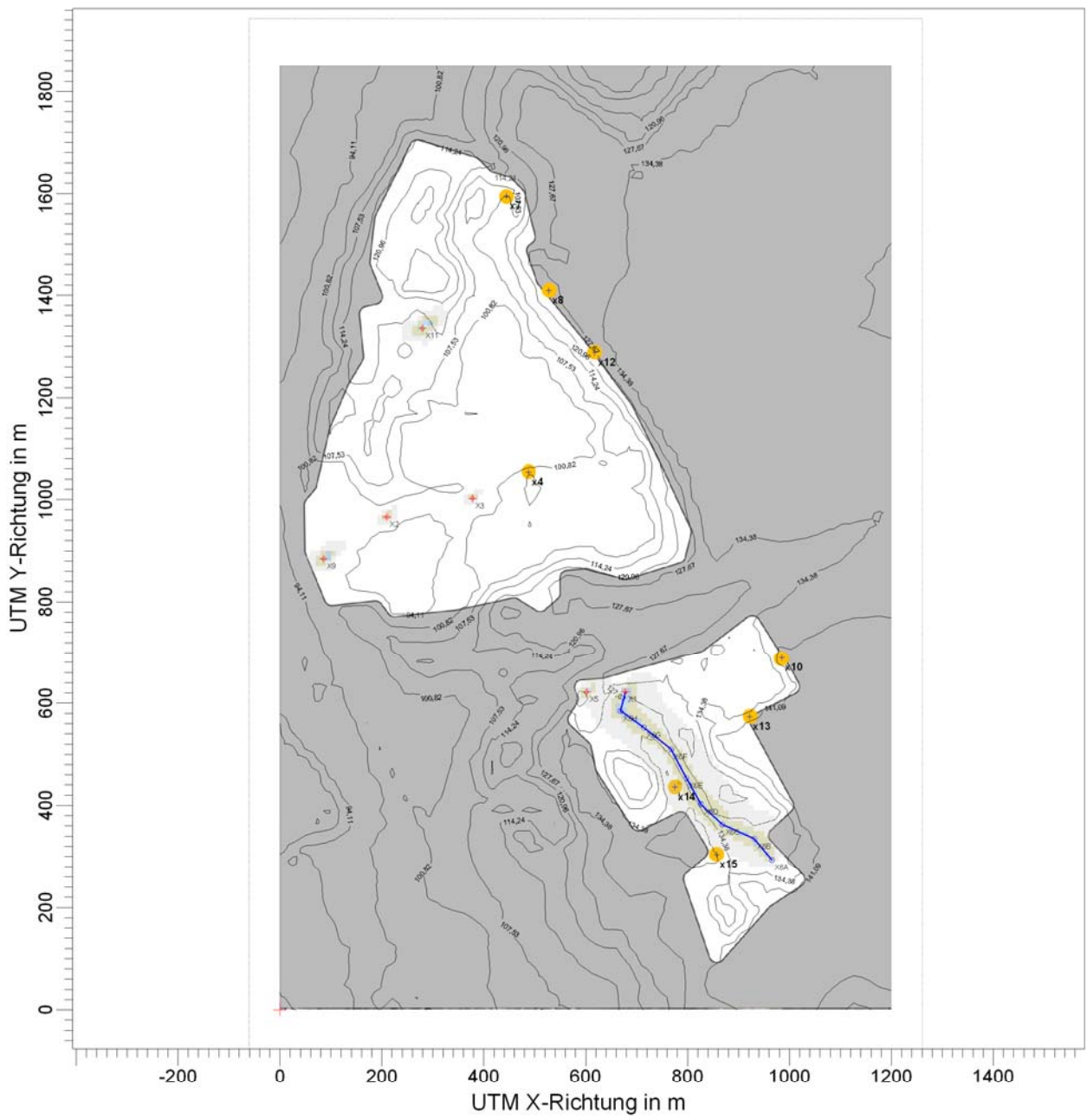
PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 265.000 m <sup>2</sup> 600.000 t/a 3.130 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 76,2	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 15		<b>MAßSTAB:</b> 1:7.327 0  0,2 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35			<b>PROJEKT-NR.:</b>

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-2 Lockergesteinstagebau



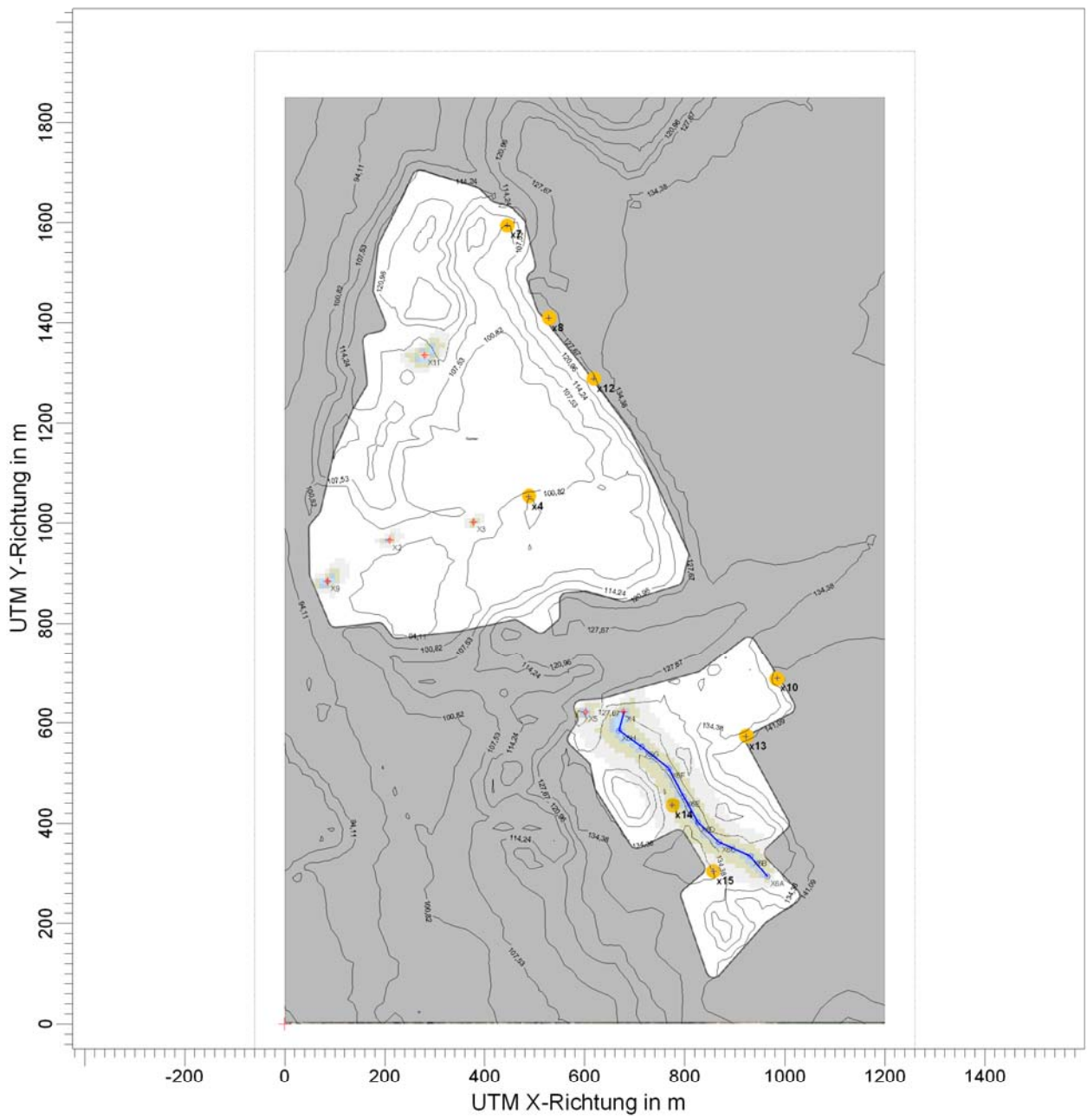
PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



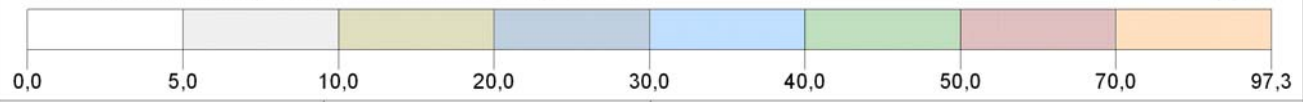
<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 567.000 m <sup>2</sup> 600.000 t/a 3.443 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 32,5	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 14		<b>MAßSTAB:</b> 1:12.833 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-2 Lockergesteinstagebau



PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

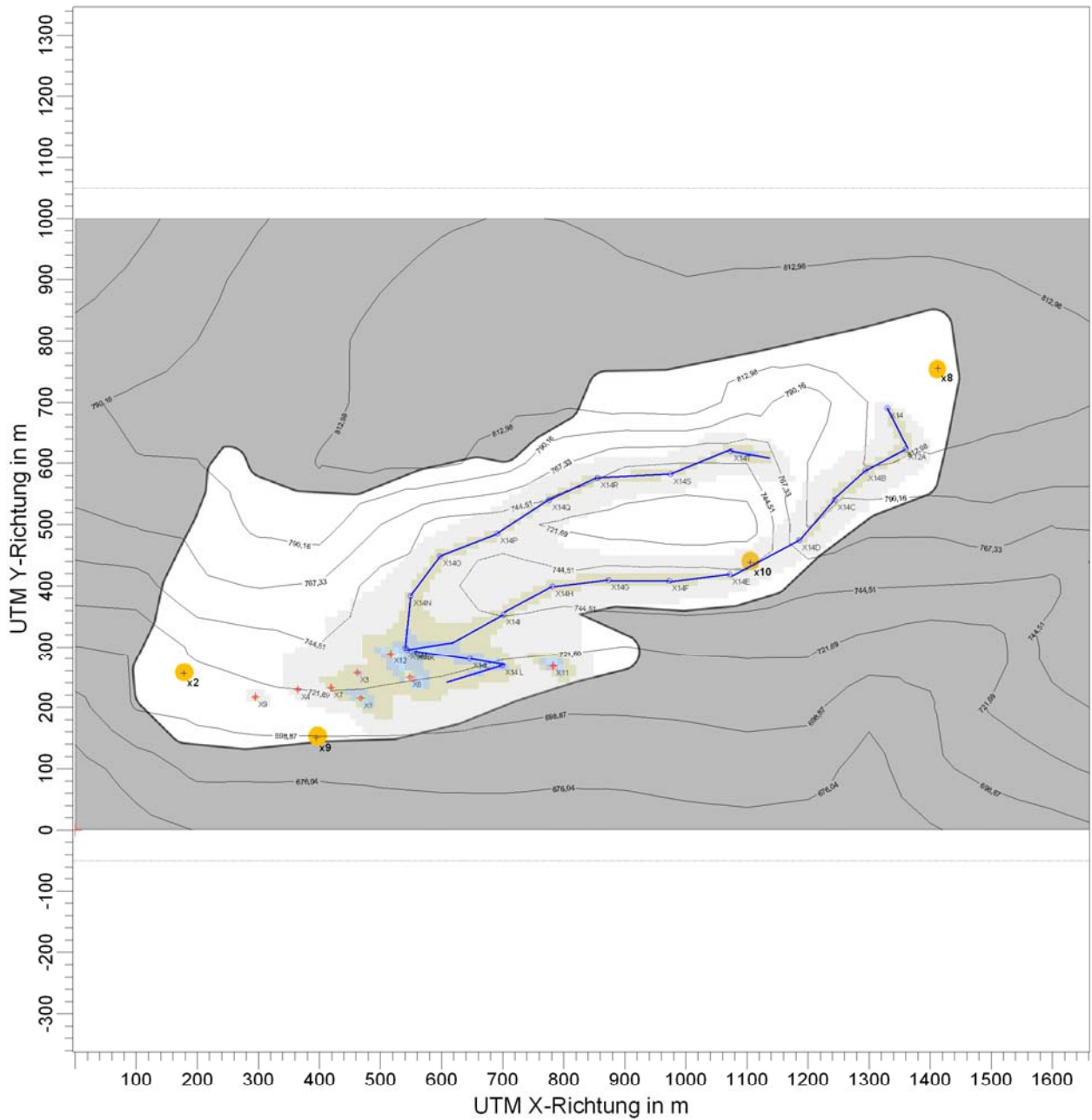
µg/m³



<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 567.000 m <sup>2</sup> 600.000 t/a 3.443 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 97,3	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 14		<b>MAßSTAB:</b> 1:13.077 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

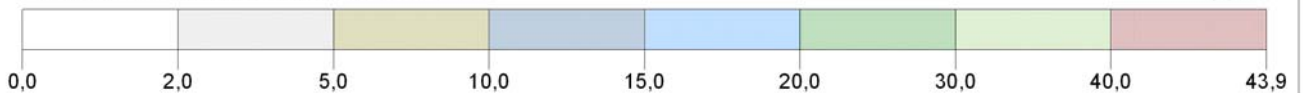


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-3 Festgesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Festgesteinstagebau  
468.000 m<sup>2</sup>  
600.000 t/a  
2.610 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

43,9

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

30

MAßSTAB:

1:10.758

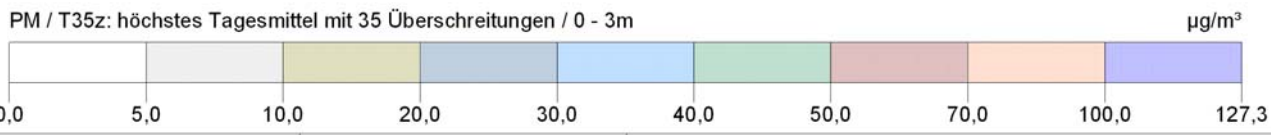
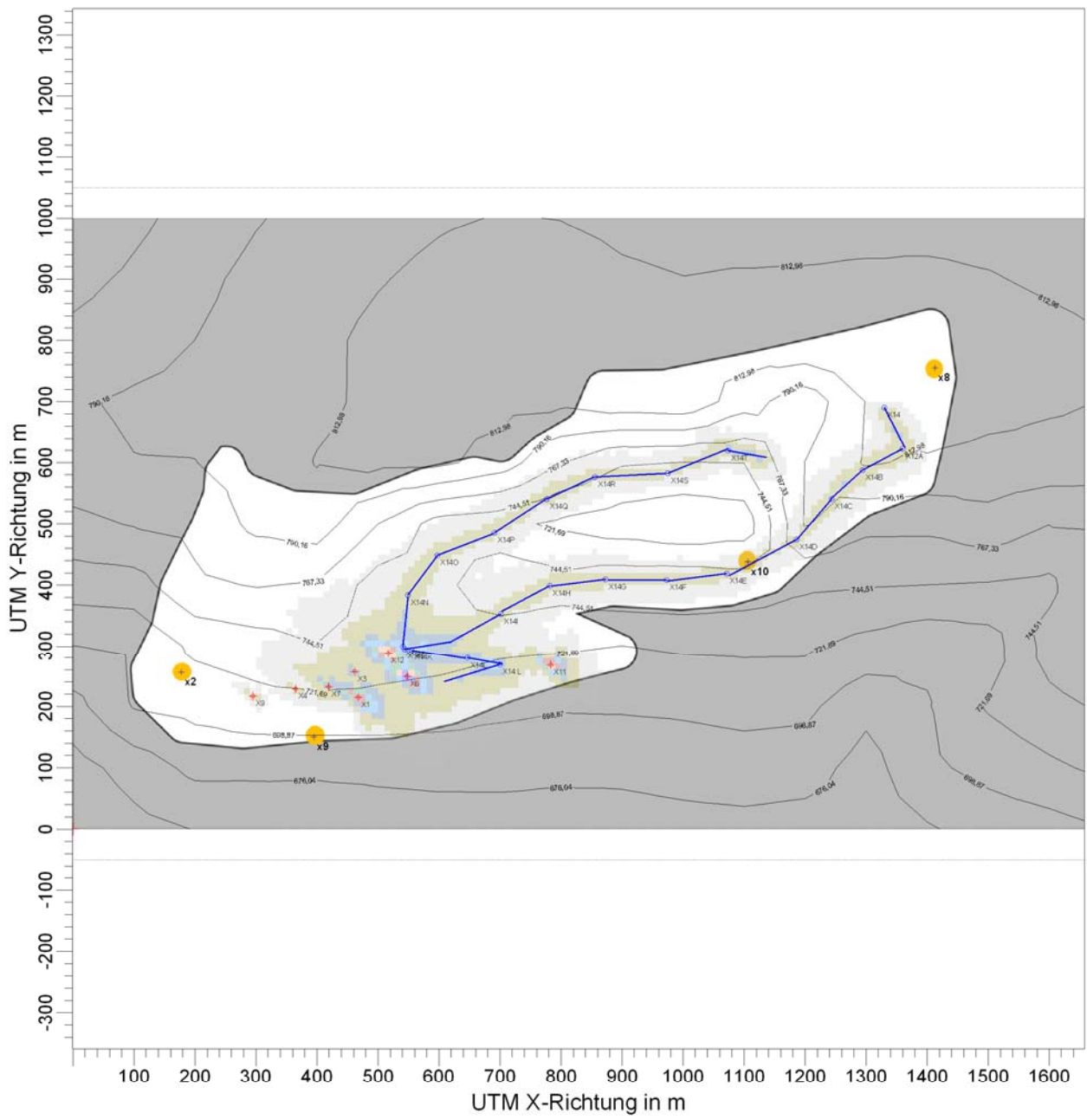
0  0,3 km

AUSGABE-TYP:

PM J00

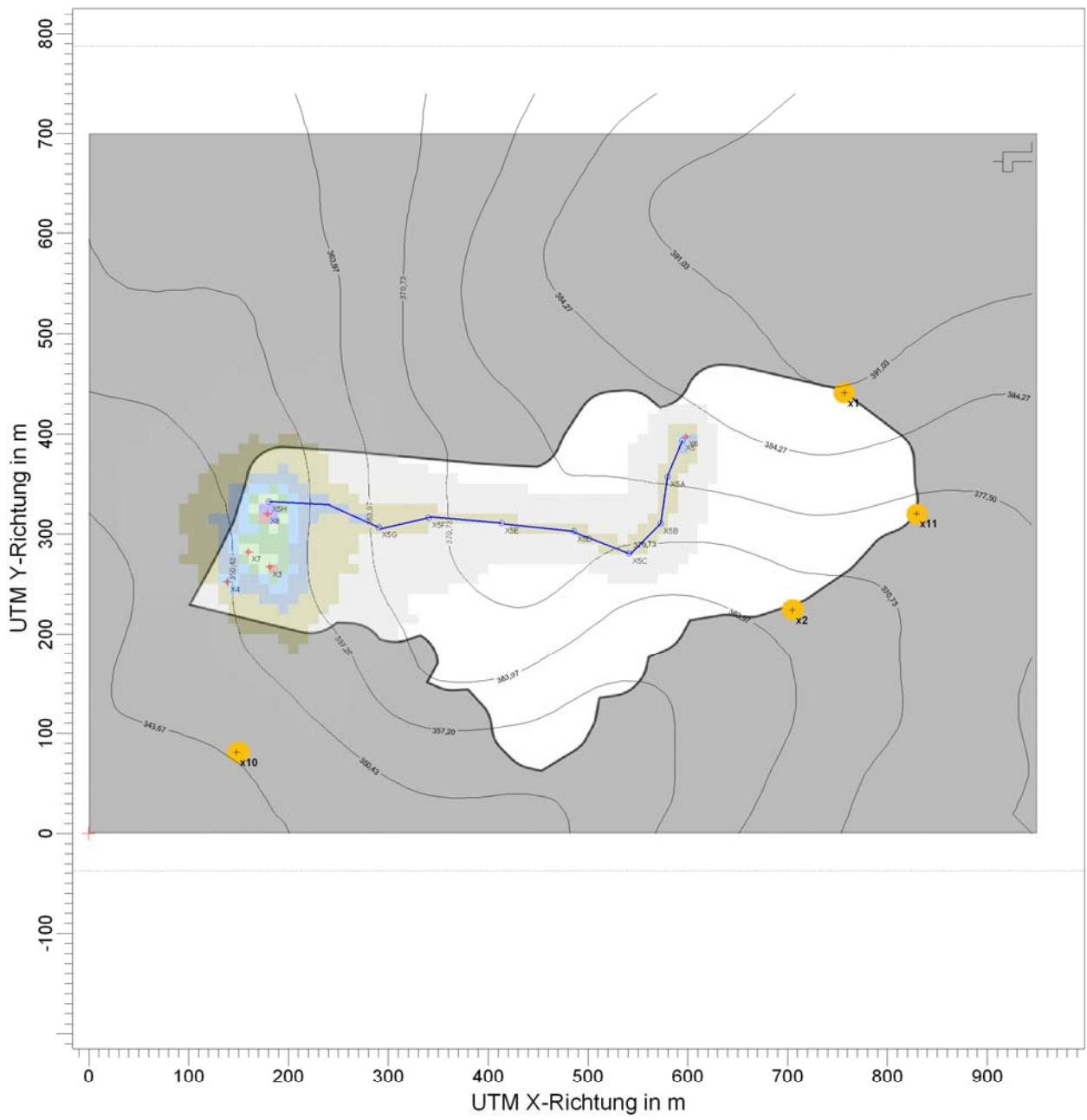
PROJEKT-NR.:

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-3 Festgesteinstagebau



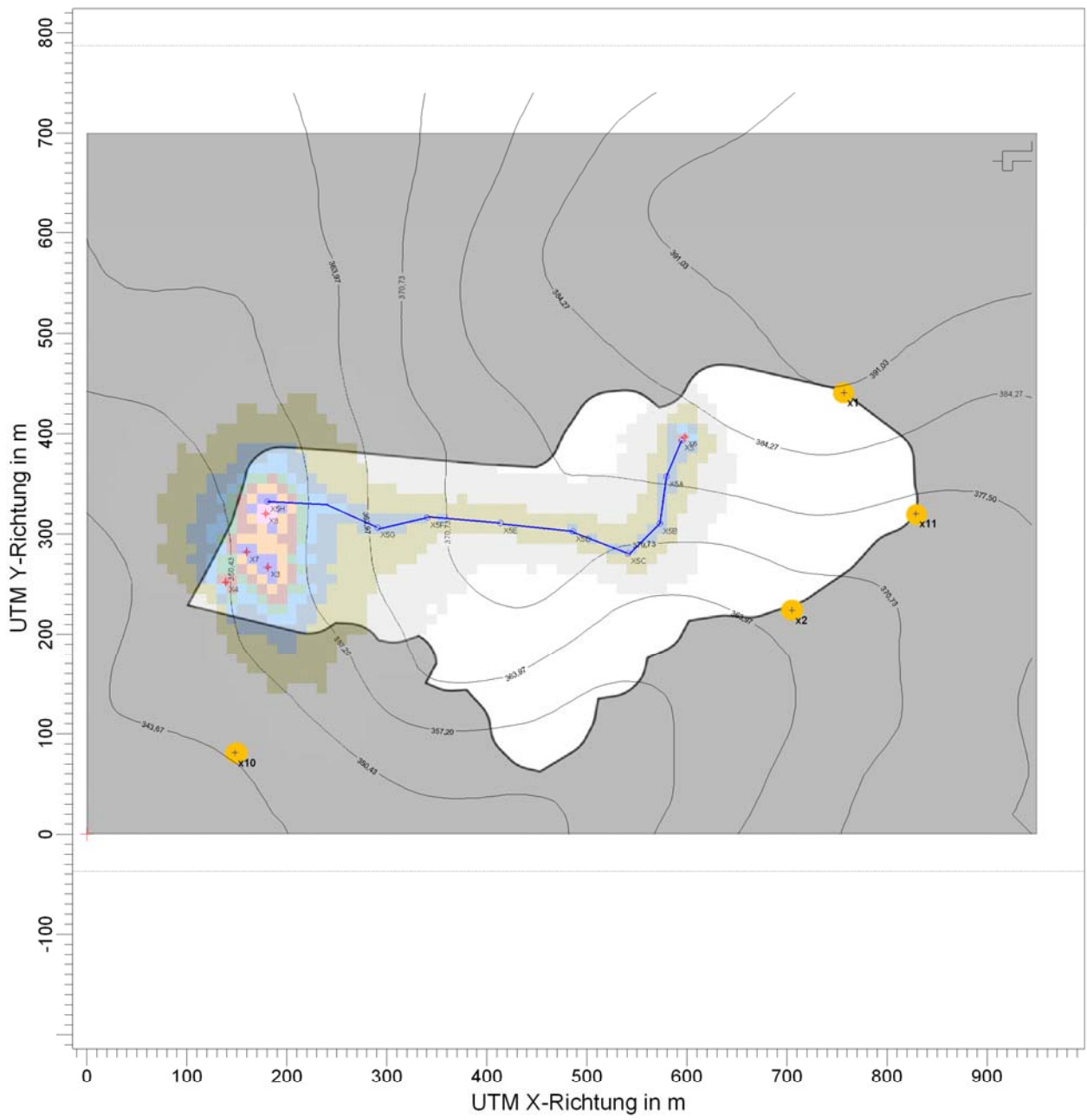
<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 468.000 m <sup>2</sup> 600.000 t/a 2.610 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 127,3	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 30		<b>MAßSTAB:</b> 1:10.716 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

**PROJEKT-TITEL:**  
**RWTH-4 Festgesteinstagebau**

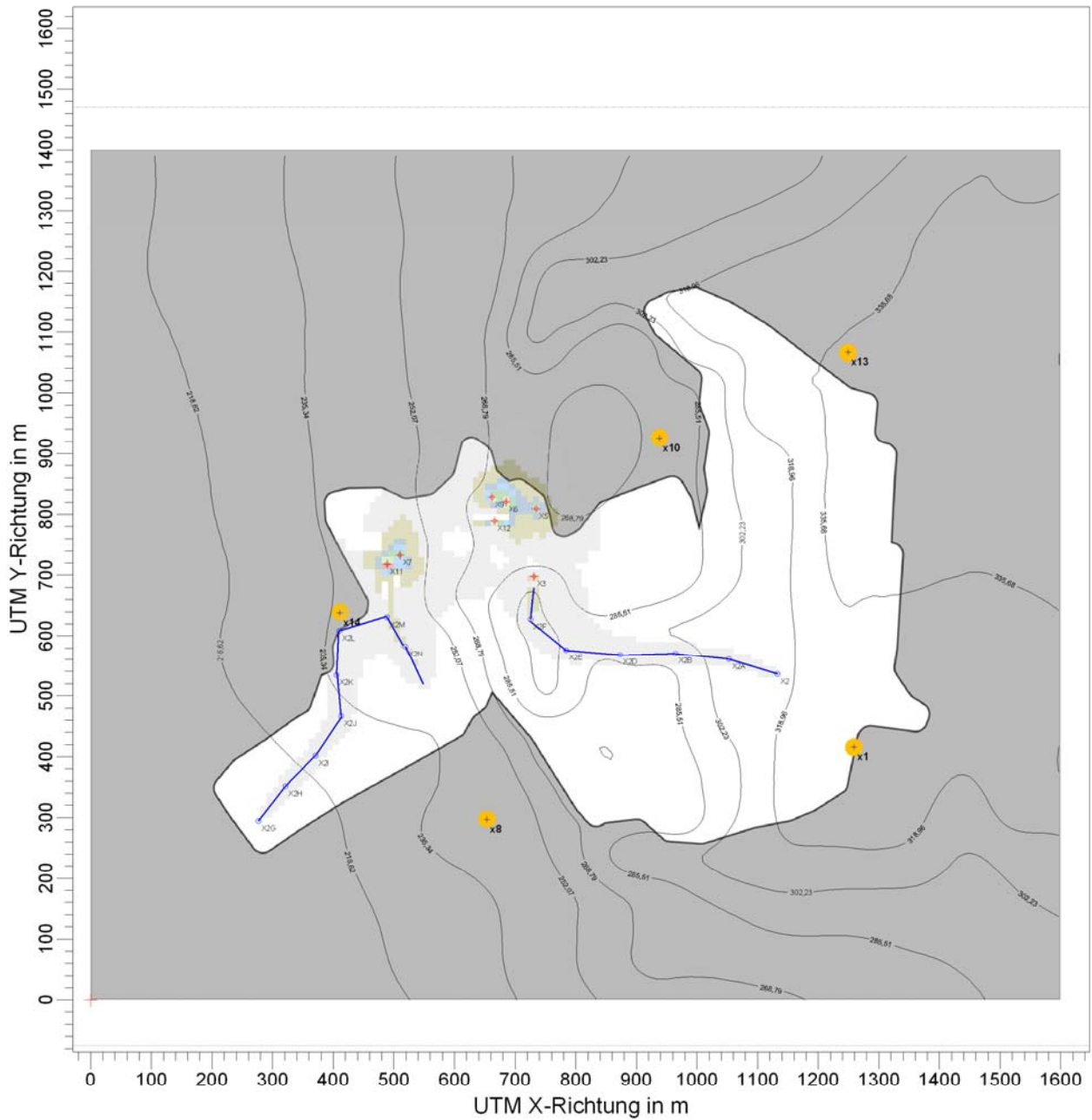




PROJEKT-TITEL:  
RWTH-4 Festgesteinstagebau




PROJEKT-TITEL:  
RWTH-5 Festgesteinstagebau



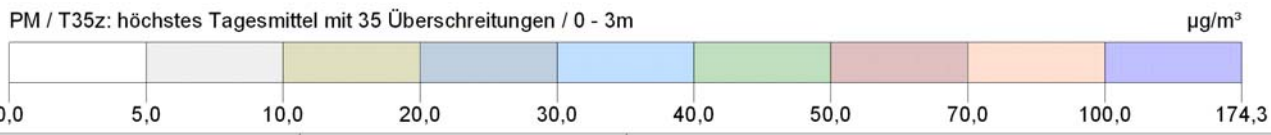
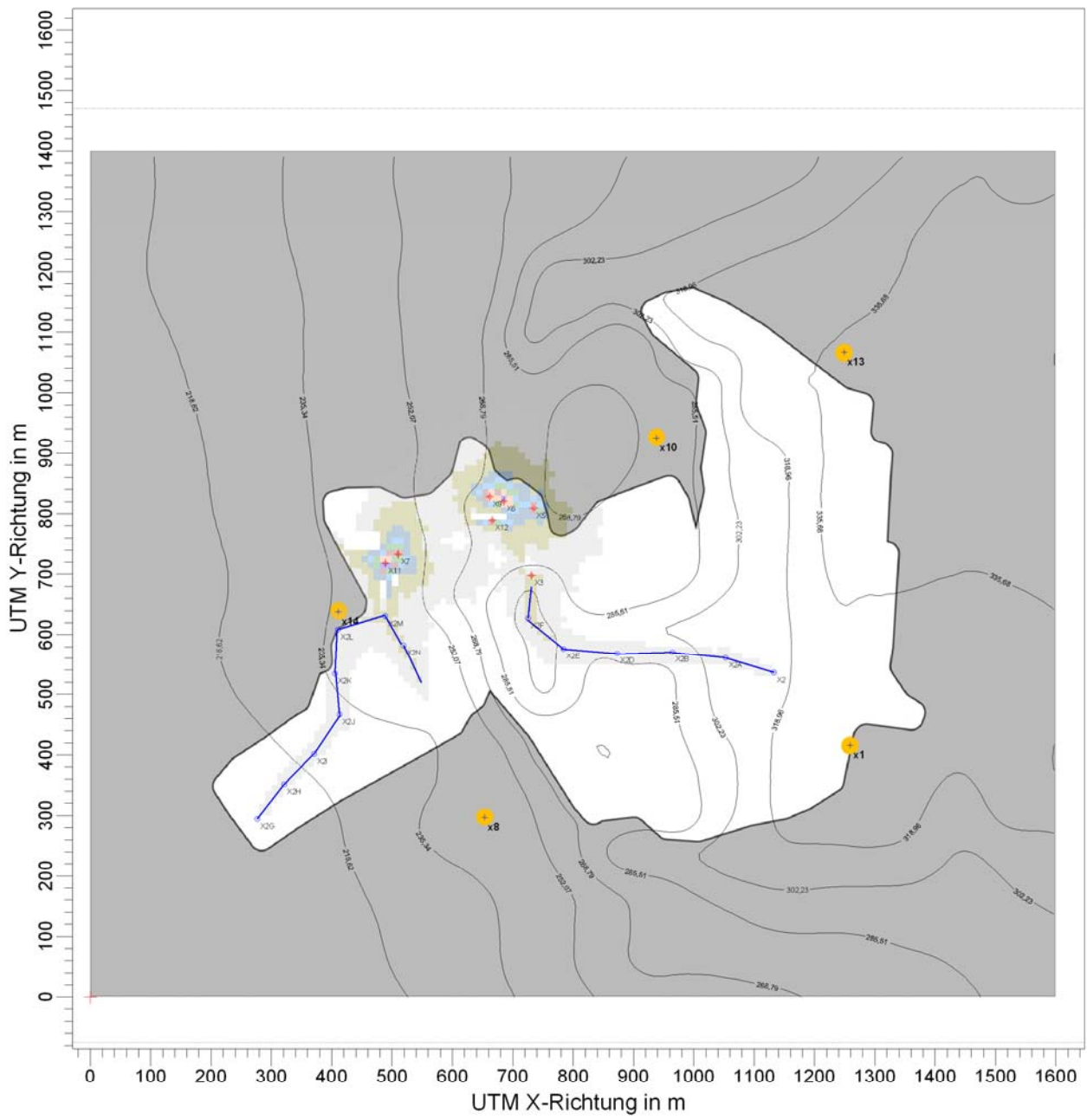
PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



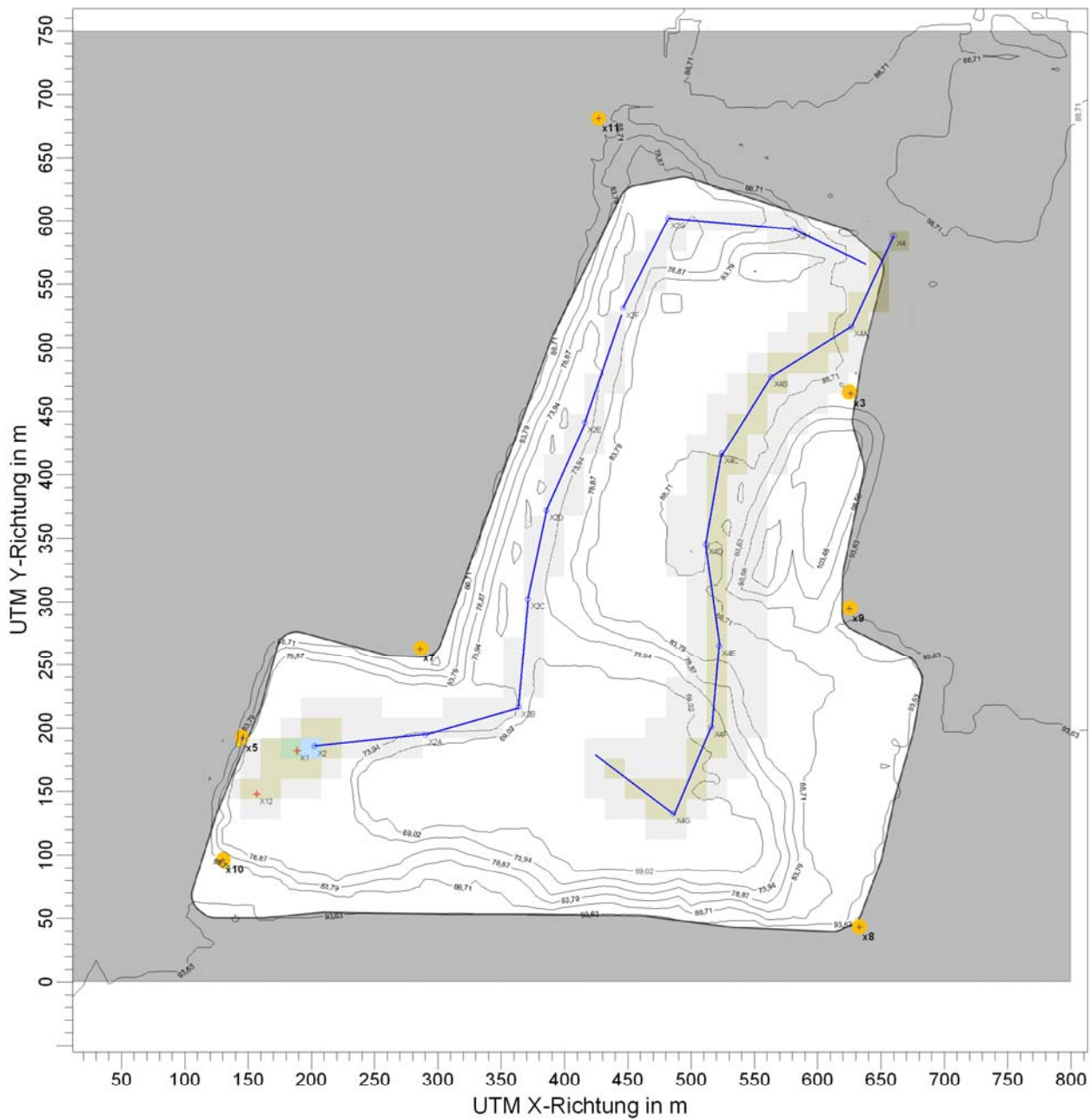
<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 600.000 m <sup>2</sup> 1.000.000 t/a 3.240 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 69,5	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 21		<b>MAßSTAB:</b> 1:10.836 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-5 Festgesteinstagebau



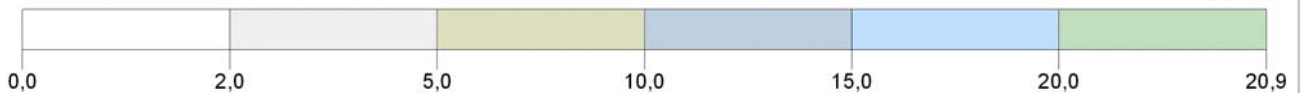
<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 600.000 m <sup>2</sup> 1.000.000 t/a 3.240 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 174,3	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 21		<b>MAßSTAB:</b> 1:10.836 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-6 Lockergesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Lockergesteinstagebau  
181.000 m<sup>2</sup>  
120.000 t/a  
1.800 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

20,9

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

19

MAßSTAB:

1:5.179

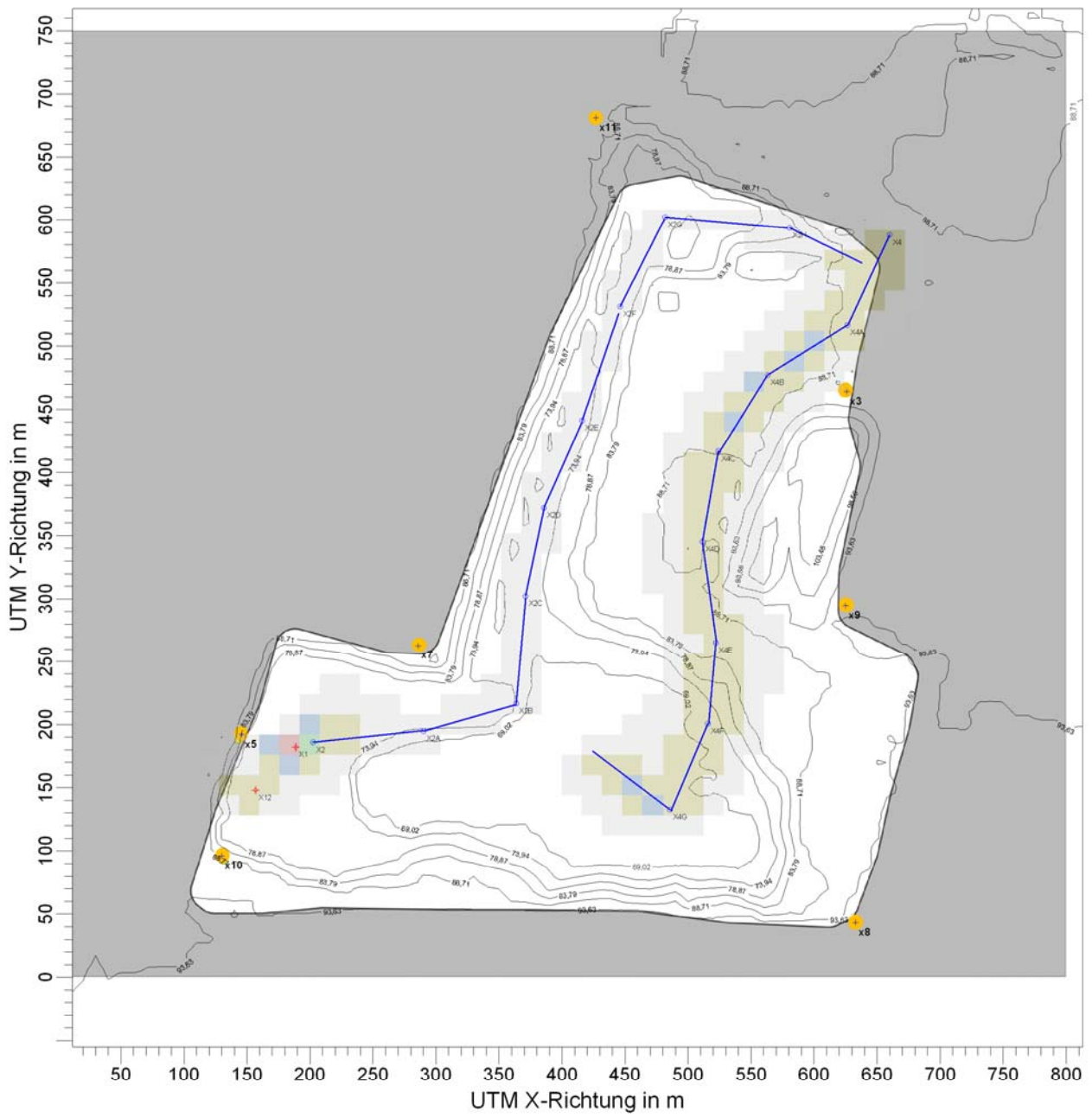
0  0,1 km

AUSGABE-TYP:

PM J00

PROJEKT-NR.:

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-6 Lockergesteinstagebau



PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Lockergesteinstagebau  
181.000 m<sup>2</sup>  
120.000 t/a  
1.800 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

67,8

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

19

MAßSTAB:

1:5.179

0 0,1 km

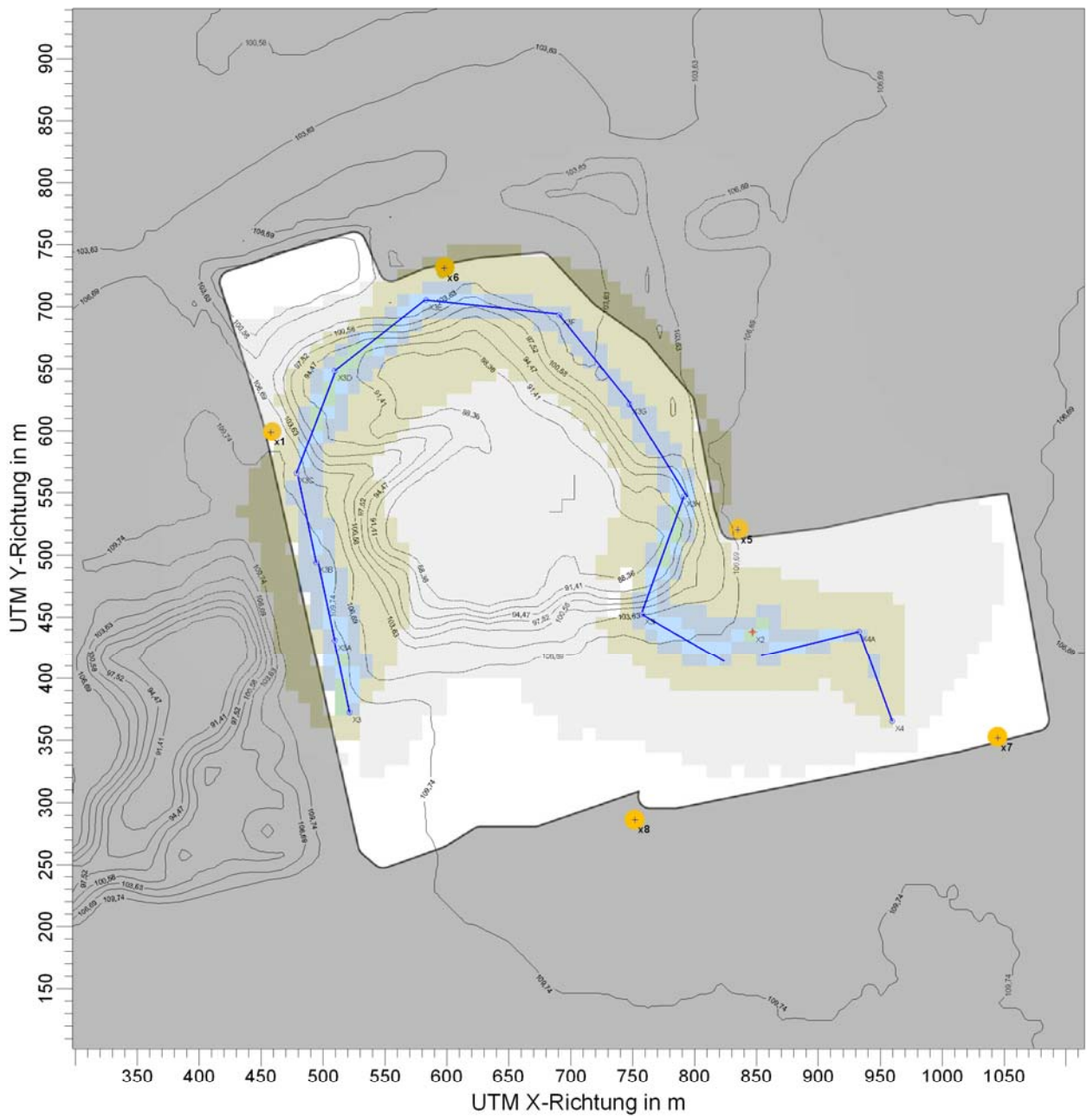
AUSGABE-TYP:

PM T35

PROJEKT-NR.:

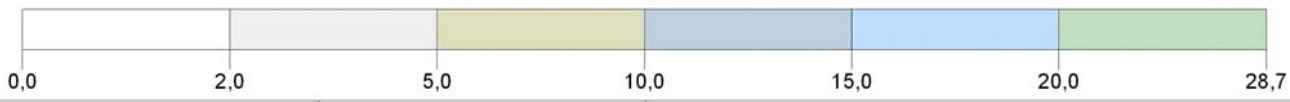



**PROJEKT-TITEL:**  
**RWTH-7 Lockergesteinstagebau**



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

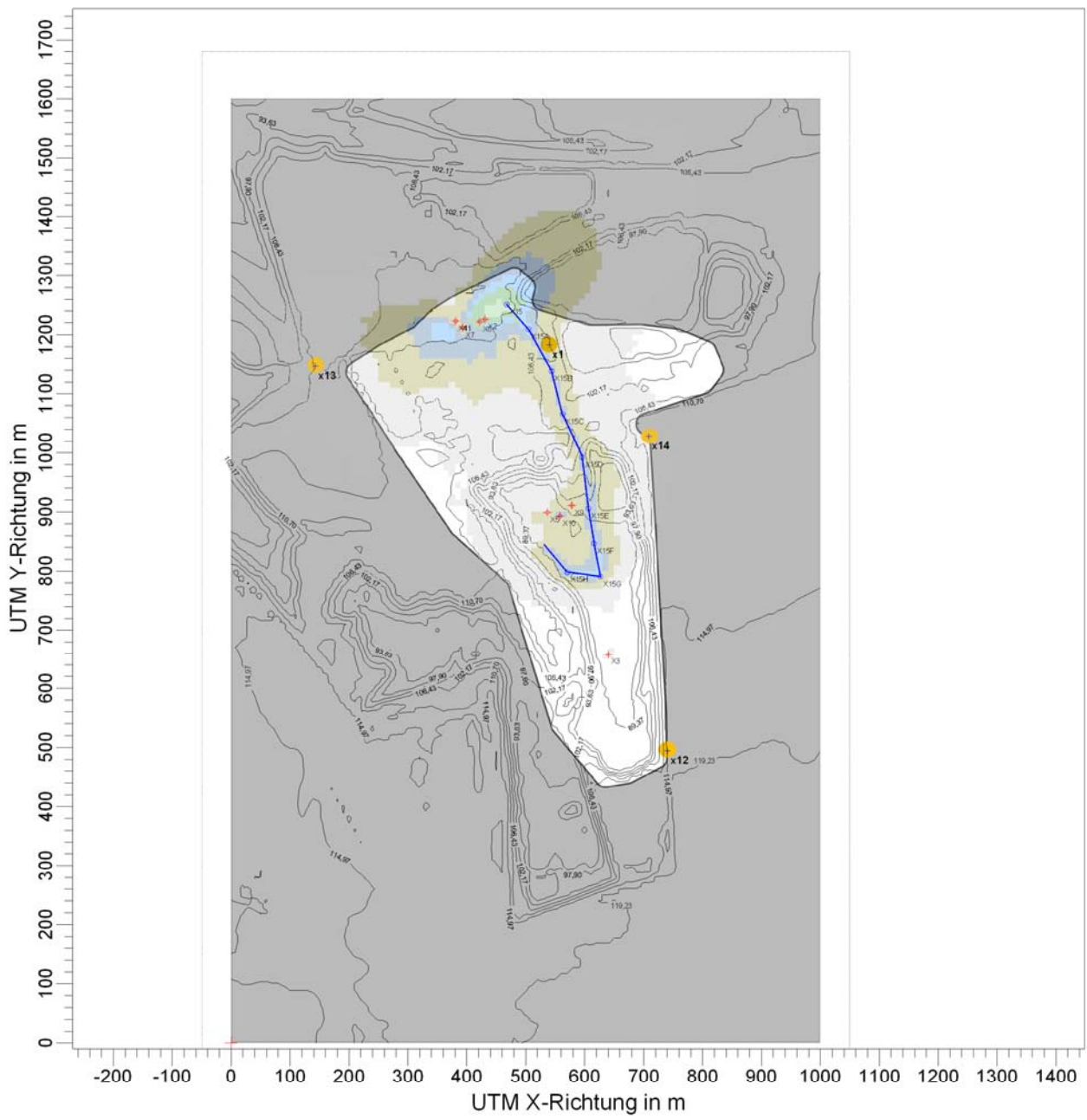
$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 200.000 m <sup>2</sup> 120.000 t/a 2.610 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 28,7	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 13		<b>MAßSTAB:</b> 1:5.280 0  0,1 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	




PROJEKT-TITEL:  
RWTH-8 Lockergesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

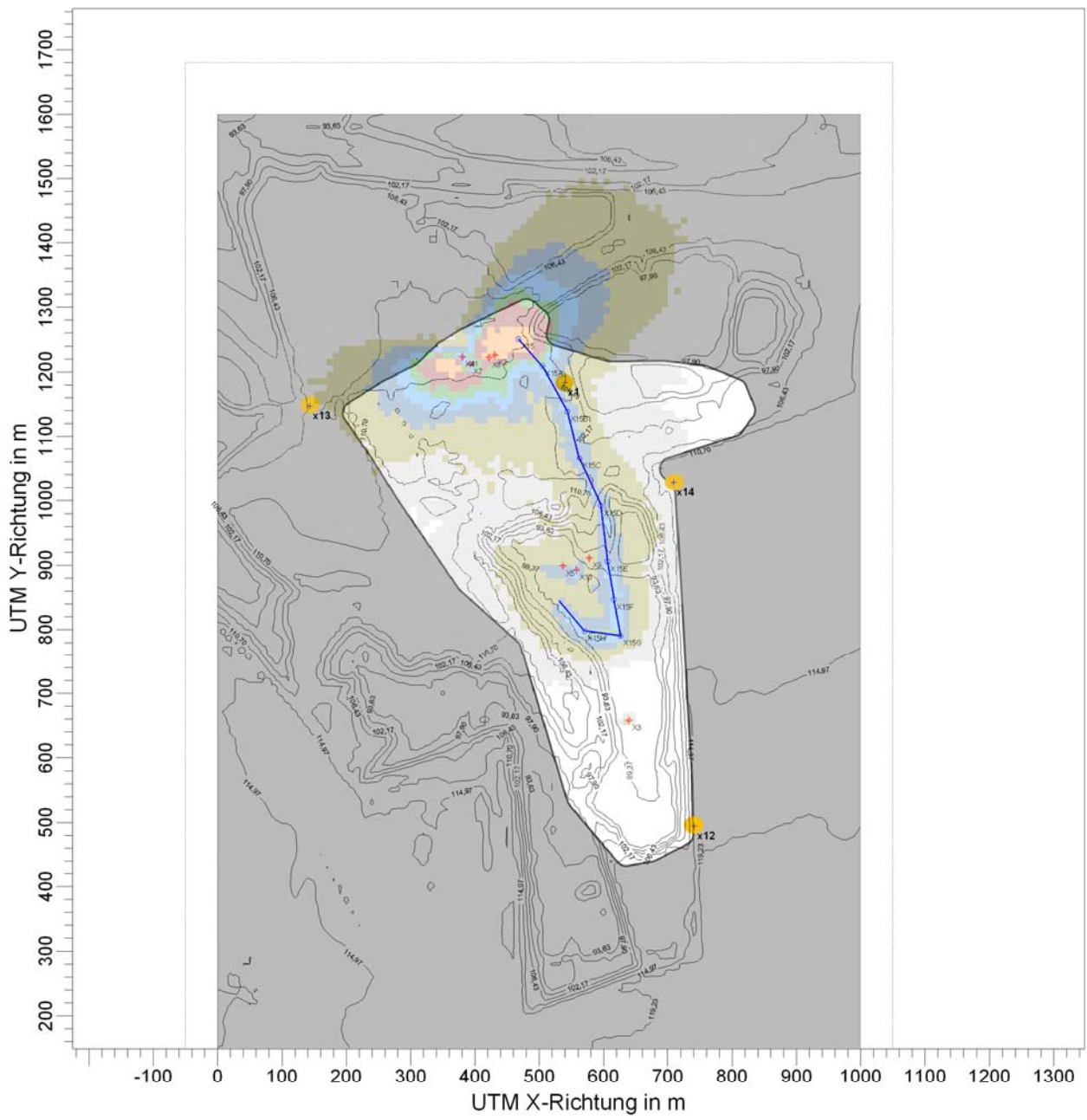
µg/m³



<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 271.000 m <sup>2</sup> 300.000 t/a 2.880 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 37,8	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 18		<b>MAßSTAB:</b> 1:11.099 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

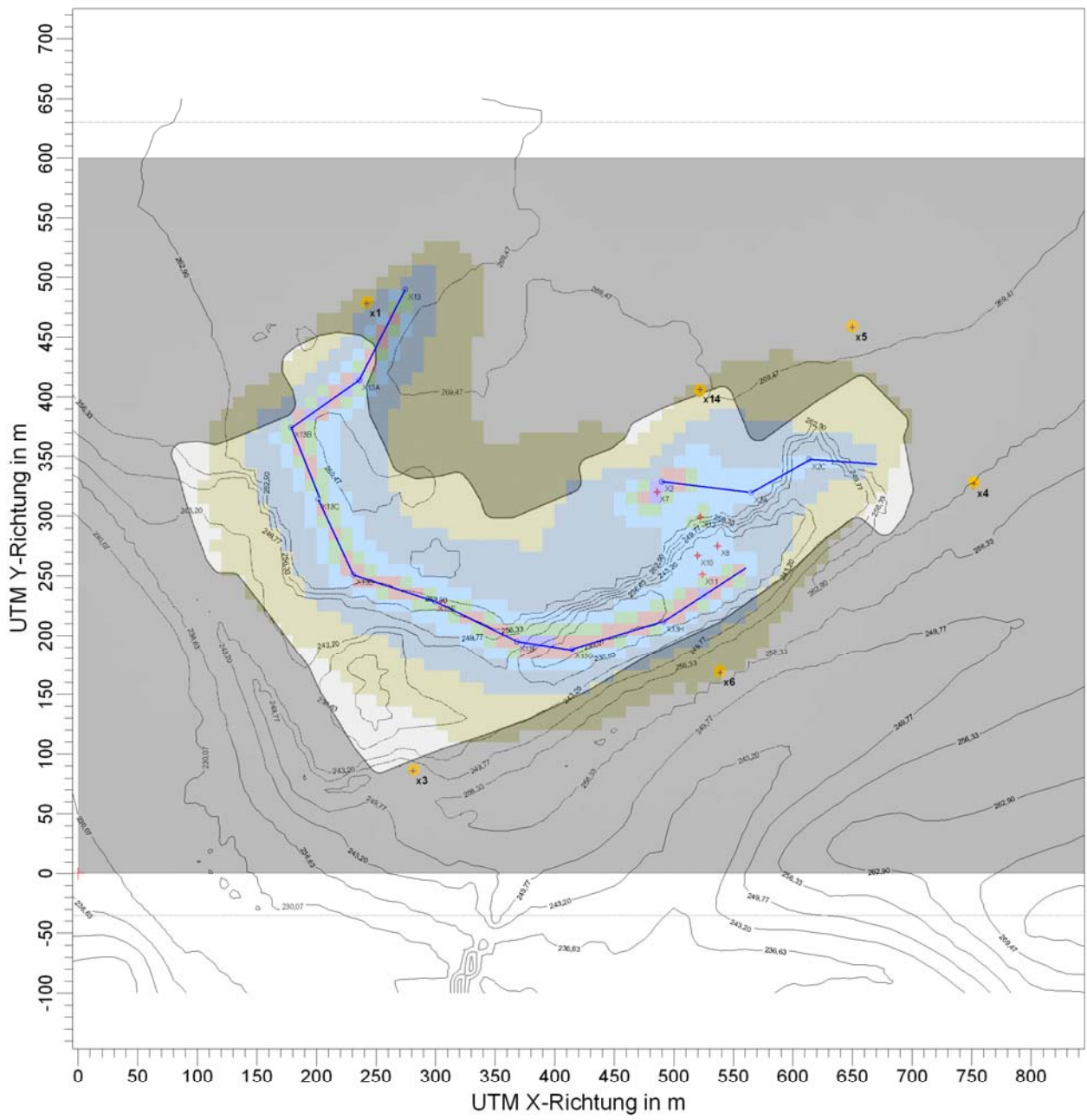


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-8 Lockergesteinstagebau



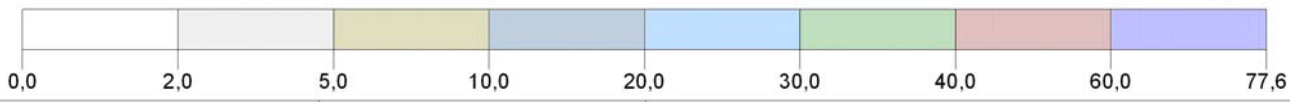
<b>BEMERKUNGEN:</b> Lockergesteinstagebau 271.000 m <sup>2</sup> 300.000 t/a 2.880 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 115,6	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 18		<b>MAßSTAB:</b> 1:10.169 0  0,3 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-9 Festgesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Festgestein  
123.000 m<sup>2</sup>  
200.000 t/a  
2640 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

77,6

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

17

MAßSTAB:

1:5.490

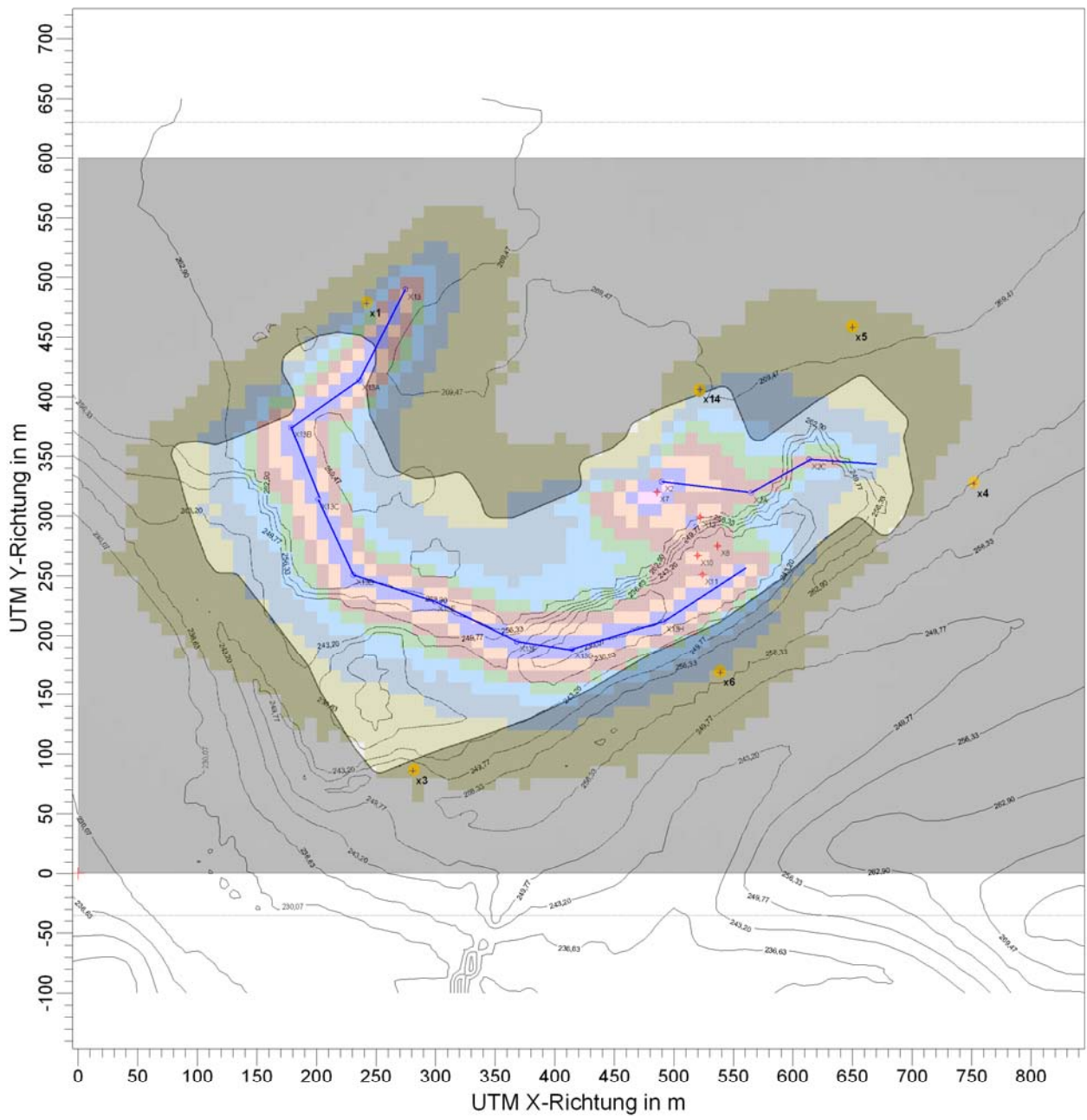


AUSGABE-TYP:

PM J00

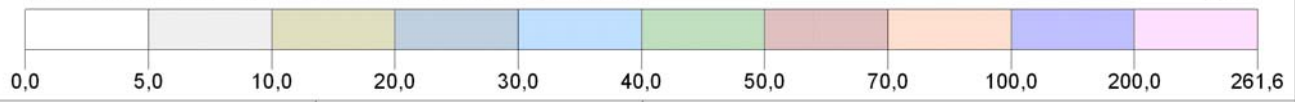
PROJEKT-NR.:


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-9 Festgesteinstagebau



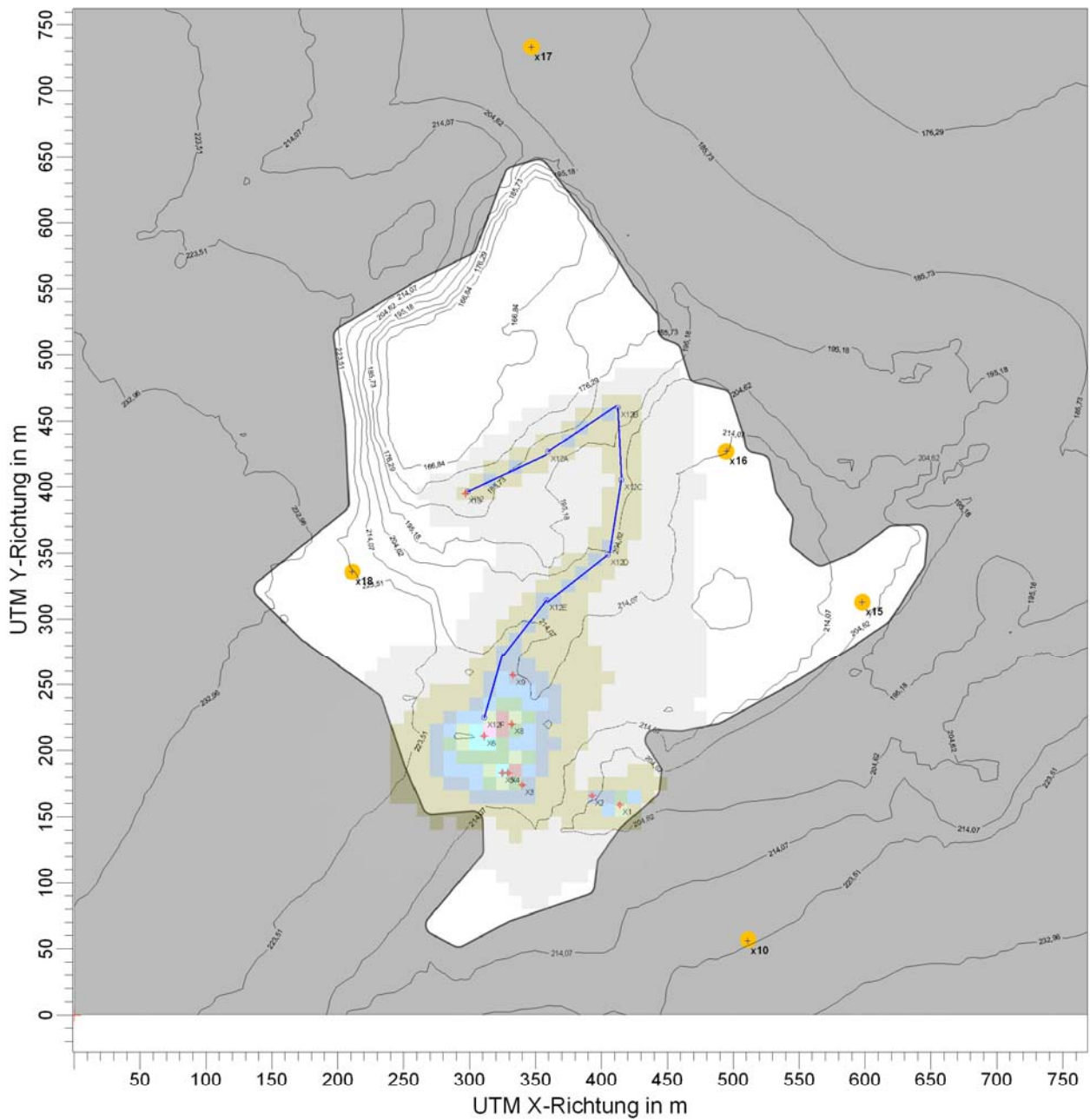
PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgestein 123.000 m <sup>2</sup> 200.000 t/a 2640 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 261,6	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 17		<b>MAßSTAB:</b> 1:5.490 0  0,1 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-10 Festgesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

µg/m³



BEMERKUNGEN:

Festgesteinstagebau  
142.000 m²  
200.000 t/a  
2.420 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

139,5

EINHEITEN:

µg/m³

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

16

MAßSTAB:

1:4.975



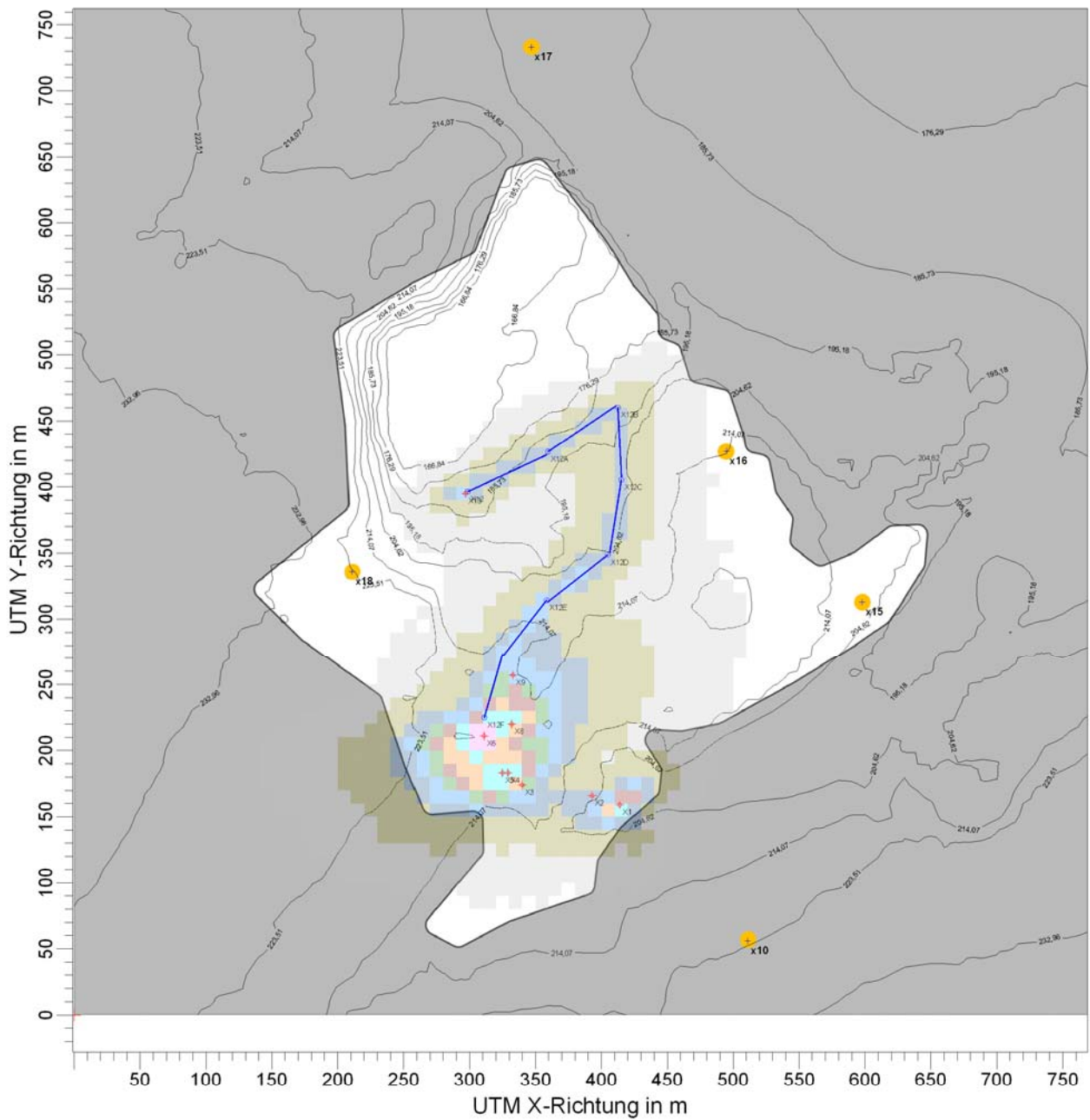
AUSGABE-TYP:

PM J00

PROJEKT-NR.:

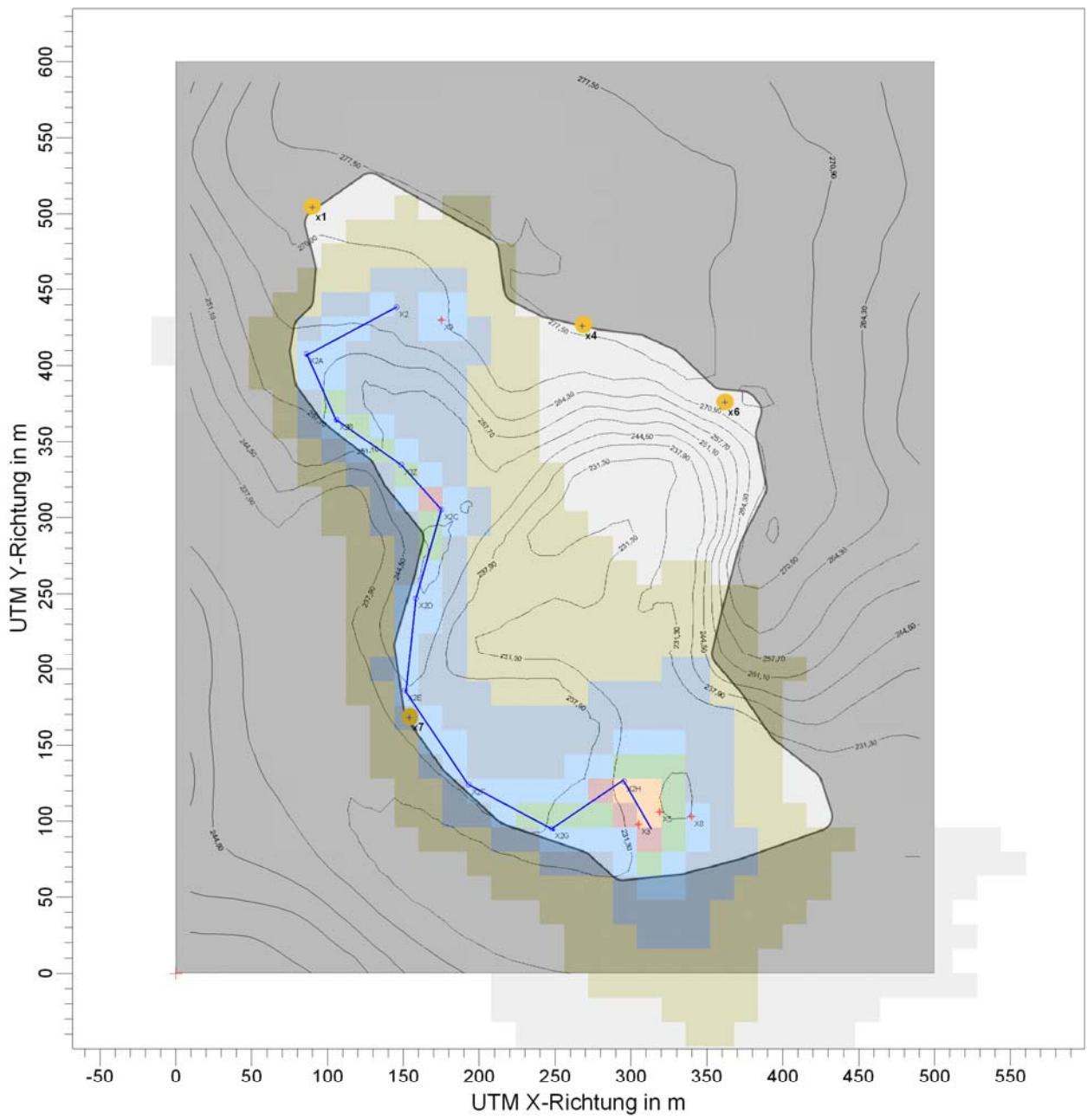


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-10 Festgesteinstagebau



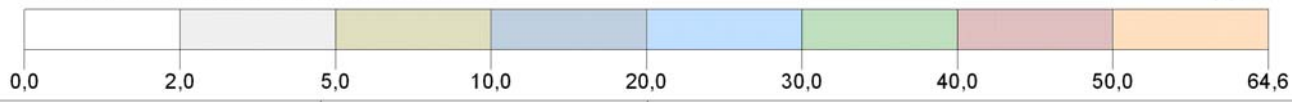
<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 142.000 m <sup>2</sup> 200.000 t/a 2.420 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 354,5	<b>EINHEITEN:</b> µg/m <sup>3</sup>	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 16		<b>MAßSTAB:</b> 1:4.975 0  0,1 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM T35		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-11 Festgesteinstagebau



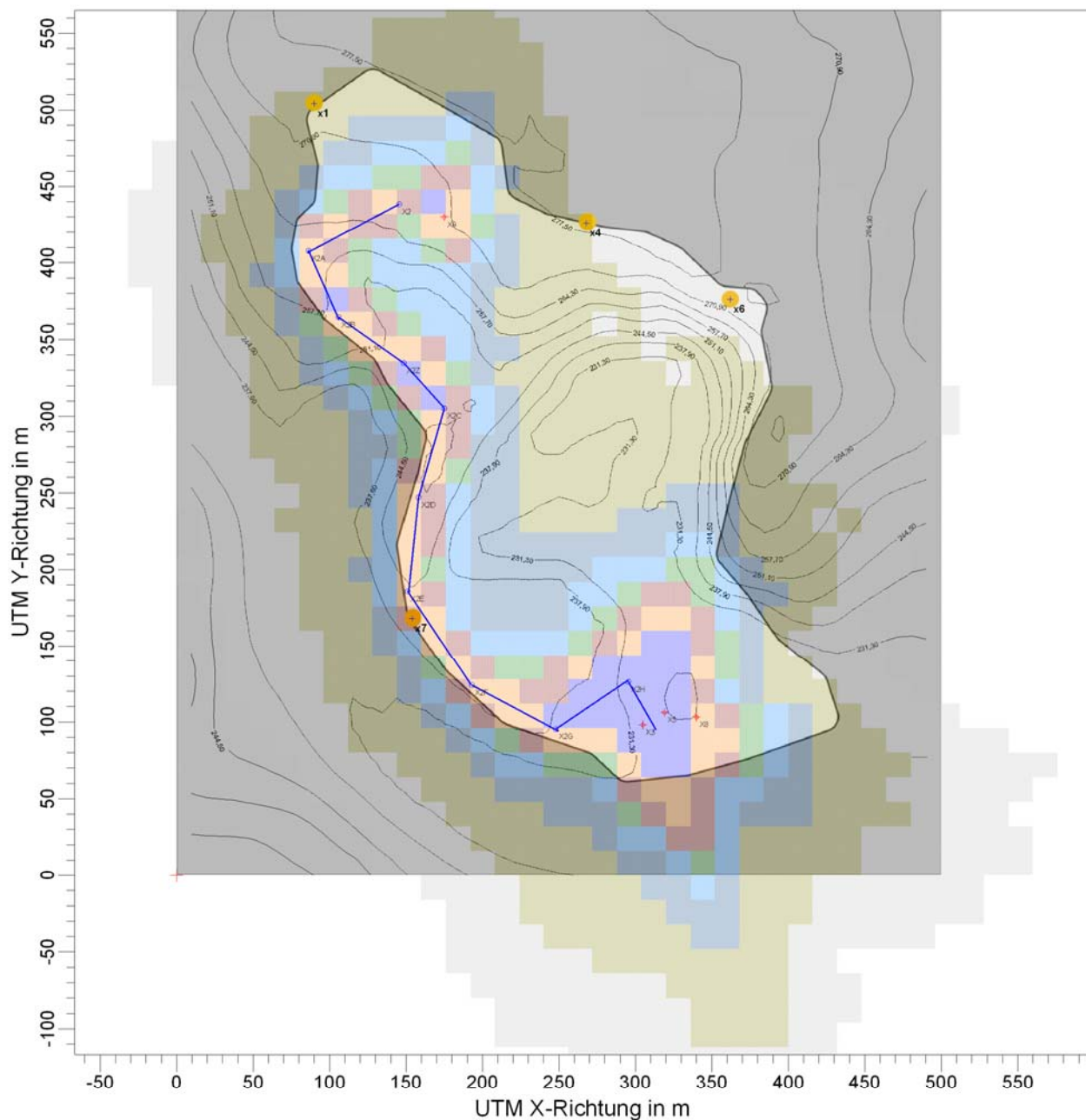
PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 97.000 m <sup>2</sup> 150.000 t/a 1.600 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 64,6	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 14		<b>MAßSTAB:</b> 1:4.310 0  0,1 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	

PROJEKT-TITEL:  
RWTH-11 Festgesteinstagebau



PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Festgesteinstagebau  
97.000 m<sup>2</sup>  
150.000 t/a  
1.600 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

220,5

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

14

MAßSTAB:

1:4.293

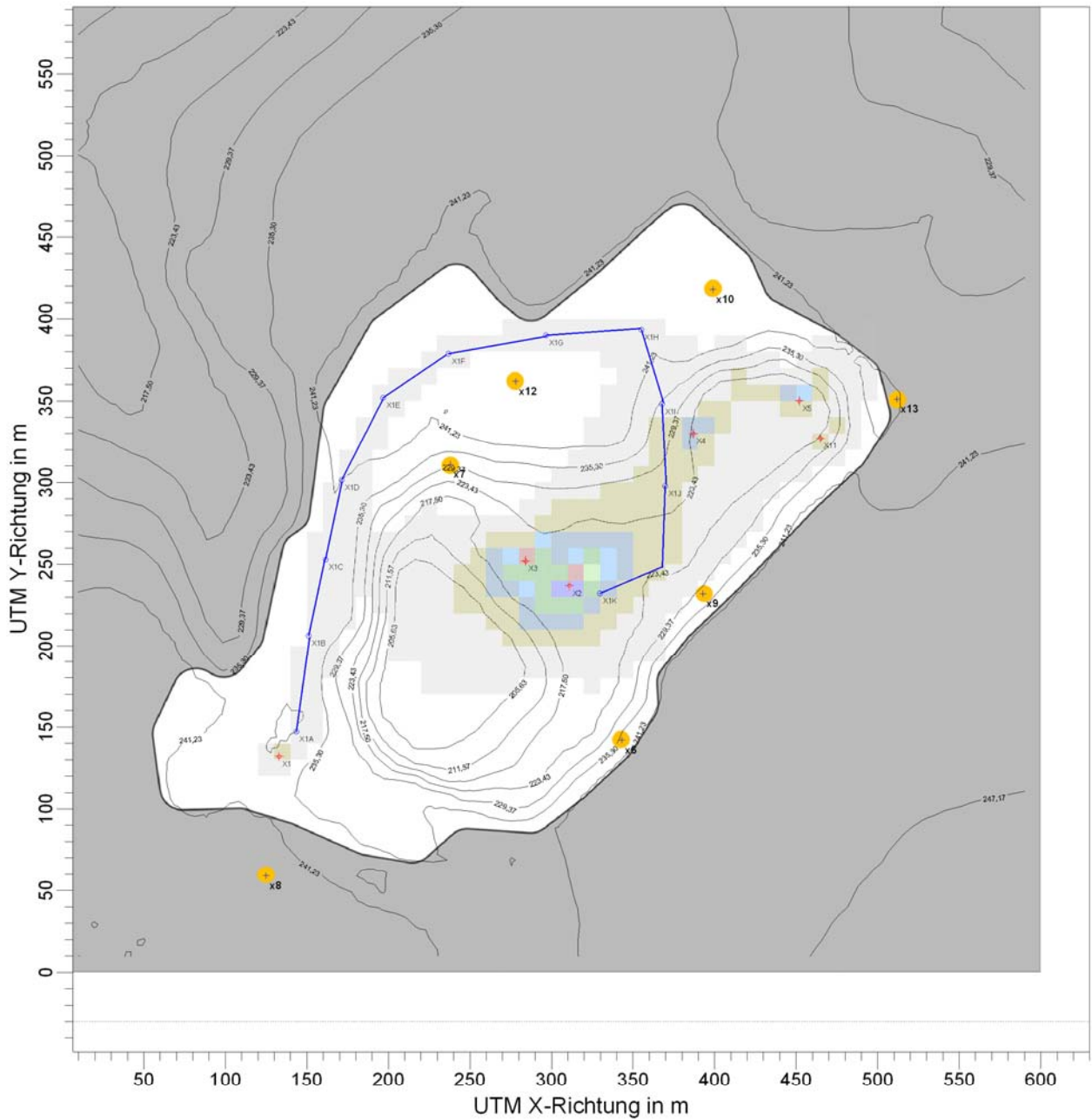
0  0,1 km

AUSGABE-TYP:

PM T35

PROJEKT-NR.:


PROJEKT-TITEL:  
RWTH-12 Festgesteinstagebau



PM / J00z: Jahresmittel der Konzentration / 0 - 3m

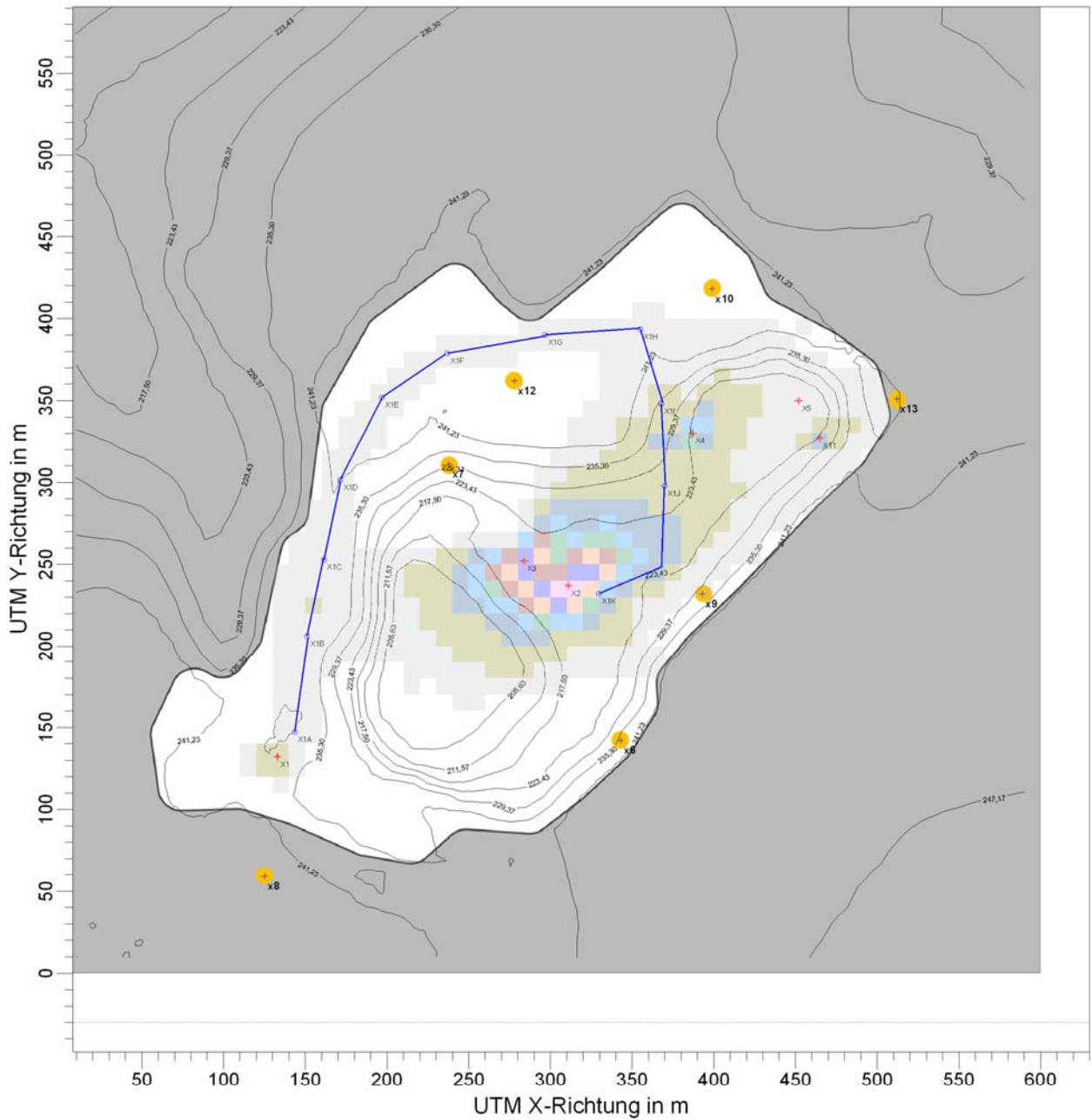
$\mu\text{g}/\text{m}^3$



<b>BEMERKUNGEN:</b> Festgesteinstagebau 95.000 m <sup>2</sup> 20.000 t/a 1.1720 h/a	<b>STOFF:</b> PM		<b>Firmenname:</b> Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen	
	<b>MAX:</b> 96,2	<b>EINHEITEN:</b> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	<b>Bearbeiter:</b> R. Böhner	
	<b>QUELLEN:</b> 17		<b>MAßSTAB:</b> 1:4.028 0  0,1 km	
	<b>AUSGABE-TYP:</b> PM J00		<b>PROJEKT-NR.:</b>	



PROJEKT-TITEL:  
RWTH-12 Festgesteinstagebau



PM / T35z: höchstes Tagesmittel mit 35 Überschreitungen / 0 - 3m

$\mu\text{g}/\text{m}^3$



BEMERKUNGEN:

Festgesteinstagebau  
95.000 m<sup>2</sup>  
20.000 t/a  
1.1720 h/a

STOFF:

PM

Firmenname:

Institut für Bergbaukunde III der RWTH-Aachen

MAX:

313,7

EINHEITEN:

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Bearbeiter:

R. Böhner

QUELLEN:

17

MAßSTAB:

1:4.020

0 0,1 km

AUSGABE-TYP:

PM T35

PROJEKT-NR.: