

Fehlende Berichterstattung von Feinstaubemissionen (PM₁₀) aus
Braunkohle-Tagebauen in PRTR

Dokumentation zur Berechnung des PM₁₀-Austrags aus dem Tagebau Hambach im Jahr 2013 und Ableitung eines Emissionsfaktors

Diese Dokumentation wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im Umweltbundesamt in den Fachgebieten II 4.1 „Grundsatzfragen der Luftreinhaltung“ und III 2.7 „Anlagenbezogene Berichterstattung“ von Alfred Trukenmüller und Dr. Anke Kuppardt-Kirmse erstellt.

Dessau-Roßlau, Oktober 2021

Zusammenfassung

Um den Berichtspflichten zu PM₁₀ als Tagebaubetreiber nach der E-PRTR-Verordnung (Verordnung EG Nr. 166/2006) nachzukommen, wurde von der RWE Power AG ein Promotionsvorhaben (Vaupel 2018) angeregt, welches die Bilanzierung des PM₁₀-Austrages aus Braunkohletagebauen zur Aufgabe hatte. Im Promotionsvorhaben wurde ein Bilanzierungsmodell entwickelt, in Excel implementiert und auf den Tagebau Hambach im Jahr 2013 angewendet. Um eine hohe Akzeptanz der berichteten Austragsdaten sicherzustellen, forderten die Betreiber das Umweltbundesamt auf, das Verfahren zu prüfen und zu bewerten. Zu diesem Zweck stellten die Betreiber die Implementierung mit den Daten für Hambach im Jahr 2013 dem Umweltbundesamt zur Verfügung. Das Verfahren entspricht in seinem Prinzip einer etablierten Methode zur indirekten messtechnischen Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen mittels Quelltermrückrechnung, ersetzt jedoch die in den Technischen Regeln (DIN 2008b, VDI 2005 und 2015c) für die Quelltermrückrechnung vorgesehenen Tracer-gasexperimente und Ausbreitungsmodelle durch ein einfaches Modell, das einige Anforderungen an die Emissionsmessung in einem geführten Abgas- oder Abluftkanal voraussetzt. Da diese Voraussetzungen in einem Tagebau nicht nachprüfbar erfüllt sind, konnte das Umweltbundesamt das Verfahren ohne weitere Prüfung nicht als E-PRTR-geeignet bewerten und gab ein Sachverständigen-gutachten nach den Anforderungen der TA Luft (2021) und der dort zitierten Technischen Regeln in Auftrag, das die fehlende Ausbreitungsmodellierung nachliefern sollte. In diesem Dokument werden die Prüfung der Excel-Implementierung und der Vergleich der Ergebnisse beider Modelle (Modell gemäß Promotionsvorhaben und Ausbreitungsmodell im Sachverständigengutachten) beschrieben. In einem zweiten Schritt wurden die im Sachverständigengutachten vorausgesetzten Emissionen so kalibriert, dass die dort ausgewiesenen rechnerischen PM₁₀-Konzentrationen die PM₁₀-Messwerte an den Stationen Elsdorf und Niederzier des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) bestmöglich reproduzierten. Schließlich wurde quantitativ geprüft, ob das Excel-Modell in so guter Übereinstimmung mit den auf diese Weise kalibrierten Ergebnissen des Sachverständigengutachtens steht, dass eine Anwendung, gegebenenfalls mit Korrekturfaktor, seitens des Umweltbundesamtes als E-PRTR-geeignet empfohlen werden kann.

Im ersten Schritt wurde also das Excel-Modell geprüft und Fehler seiner Implementierung (Abweichungen der Implementierung von Gleichungen der Dissertationsschrift) korrigiert. Das Excel-Modell liegt nun in fehlerbereinigter Form vor und berechnet den Austrag von PM₁₀ in kg für jede Stunde des Jahres 2013. Die Berechnung basiert auf Immissionsmessungen an zwei Messpunkten in Luv und Lee des Tagebaus, der Messung meteorologischer Daten und einer Modellierung des sogenannten Bilanzierungsquerschnitts.

Das Sachverständigengutachten berechnet für bestimmte Windrichtungen und Ausbreitungsklassen die zu erwartende Konzentration an PM₁₀ basierend auf 15 verschiedenen Emissionsquellen im Tagebau. Vor dem Vergleich beider Modelle musste eine Regressionsanalyse dieser verschiedenen Emissionsquellen durchgeführt werden, da nicht alle Quellen gleichermaßen zur Gesamtemission des Tagebaus beitragen. Mit der Methode der schrittweisen Regression wurden die Quellen identifiziert und in Regressionsmodelle übernommen, die mit der größten Signifikanz zur Erklärung der beobachteten Konzentrationen beitrugen. Verschiedene so hergeleitete Regressionsmodelle wurden geprüft und jeweils eines pro Ausbreitungs-kategorie zur Weiterverwendung ausgewählt.

Die Koeffizienten der Regressionsmodelle sind Gewichte, mit denen die einzelnen Emissionsquellen des Tagebaus im Ausbreitungsmodell des Sachverständigengutachtens zur Konzentration am Messpunkt beitragen. Mit dieser Information wurde aus dem Sachverständigengutachten zuerst die Fläche und dann die Höhe des Bilanzierungsquerschnitts abgeleitet. Letztere wurde zur Höhe des Bilanzierungsquerschnitts aus dem Excel-Modell ins Verhältnis gesetzt und aus dem Quotienten

dieser beiden Höhen ein Korrekturfaktor für das Excel-Modell ermittelt. Die Analyse des Quotienten zeigte, dass nur für bestimmte Windrichtungen eine zufriedenstellende Übereinstimmung des Excel-Modells mit dem Sachverständigengutachten gegeben war. Bei davon abweichenden Windrichtungen lagen die Ergebnisse beider Modelle um mehrere Zehnerpotenzen auseinander.

Zur Berechnung des Korrekturfaktors wurde daher nur der Windrichtungsbereich verwendet, in dem das Excel-Modell in größter Übereinstimmung mit dem Sachverständigengutachten steht. Diese Berechnung wurde für jede Ausbreitungsklasse und die beiden Messpunkte separat durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass nur für einen Messpunkt (Elsdorf-Berrendorf) ein Korrekturfaktor notwendig ist. Dieser wurde als gewichteter Mittelwert von den Ausbreitungsklassen II, III/1 und V bestimmt und für weitere Berechnungen in allen Ausbreitungsklassen verwendet.

Die größte Diskrepanz zwischen Excel-Modell und Sachverständigengutachten wurde für die Windrichtungen festgestellt, die nicht parallel zur Achse der beiden Messpunkte strömen. Die im Sachverständigengutachten berechneten Konzentrationsfelder zeigen, dass bei diesen Windrichtungen zwar Austräge von PM_{10} aus dem Tagebau stattfinden, aber nicht von den Messpunkten erfasst werden. Aus diesem Grund wurden die gemessenen Differenzen der PM_{10} -Konzentration in Luv und Lee als Funktion der Windrichtung analysiert, wofür die Konzentrationen durch Bildung eines gleitenden Mittelwerts geglättet wurden. Für jede Ausbreitungsklasse wurde so der Windrichtungsbereich definiert, für den der PM_{10} -Austrag am zuverlässigsten gemessen werden konnte. In diesem Windrichtungsbereich wurde auf Basis des Excel-Modells ein Wert für den mittleren PM_{10} -Austrag pro Stunde berechnet. Hier floss beim Messpunkt Elsdorf-Berrendorf der erwähnte Korrekturfaktor ein, während der mittlere PM_{10} -Austrag am Messpunkt Niederzier ohne Korrektur aus dem Excel-Modell übernommen wurde. Die so berechneten mittleren PM_{10} -Austräge pro Stunde je Ausbreitungsklasse dienten zusammen mit der Häufigkeit der Ausbreitungsklassen als Grundlage für die Berechnung des gesamten jährlichen Austrages.

Am hier untersuchten Beispiel des Tagebaus Hambach im Jahr 2013 zeigt sich, dass das Excel-Modell ohne die auf das Sachverständigengutachten gestützte Korrektur keine wirklichkeitsnahen Werte liefert. Daher kann es nicht direkt für andere Tagebaue angewandt werden. Denn auch dort müssten für jeden betrachteten Tagebau und Zeitraum die fehlenden Windfeld- und Ausbreitungsmodellierungen durchgeführt werden. Um eine bundeseinheitliche Berichterstattung über den PM_{10} -Austrag aus Braunkohletagebauen nach objektiven Kriterien zu ermöglichen, kann mittels des hier berechneten Jahresaustrags an PM_{10} und der Angabe zur geförderten Kohlenmenge ein Emissionsfaktor berechnet werden. Dieser ließe sich dann – bei vergleichbarem Stand der Technik – auch auf andere Jahre und auf andere Braunkohletagebaue in Deutschland anwenden. Der für den Tagebau Hambach im Jahr 2013 exakt berechnete Emissionsfaktor liegt bei $15,5 \text{ g } PM_{10} / \text{ t Kohle}$. Da Hambach mit seiner derzeitigen Abbaufäche der größte Braunkohletagebau in Deutschland ist, schlägt das Umweltbundesamt für die allgemeine Anwendung bei Braunkohletagebauen in Deutschland einen leicht abgerundeten Emissionsfaktor von 15 g/t vor.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
1 Einleitung.....	5
2 Überprüfung und Korrektur des Excel-Modells nach Vaupel.....	6
3 Vergleich der Modellergebnisse mit den Ergebnissen des Sachverständigengutachtens.....	7
3.1 Kernelemente des Sachverständigengutachtens.....	7
3.2 Regressionsmodell zur Ermittlung der Anteile einzelner Quellen am PM ₁₀ -Austrag im Modell des Sachverständigengutachtens	10
3.3 Qualitätssicherung: Überprüfung und Auswahl der Regressionsmodelle	13
3.4 Berechnung einer Referenzhöhe Z_{ref} für den Vergleich mit der Höhe Z_{exit} des Bilanzierungsquerschnitts aus dem Excel-Modell.....	15
3.5 Bestimmung der Kernwindrichtungsbereiche zur Ermittlung der Korrekturfaktoren	16
4 Berechnung der korrigierten Jahresfracht für Hambach im Jahr 2013.....	19
4.1 Problem fehlender Messstationen.....	19
4.2 Berechnung der mittleren Stundenfracht.....	20
4.3 Berechnung der Jahresfracht	22
4.4 Qualitätssicherung: Überprüfung der Niederschlagskorrektur.....	22
5 Ermittlung des Emissionsfaktors	23
6 Quellenverzeichnis	24
Anhang	26
A.1 Überprüfung des Excel-Werkzeugs zur Bestimmung der Ausbreitungsklasse.....	26
A.2 Überprüfung des Excel-Modells	26
A.3 Doppelsummenanalyse	32
A.3.1 Ausbreitungsklasse AK1.....	32
A.3.2 Ausbreitungsklasse AK2.....	32
A.3.3 Ausbreitungsklasse AK6.....	33
A.4 Bestimmung der Kernwinkelbereiche zur Ermittlung der Korrekturfaktoren	34
A.4.1 Ausbreitungsklasse AK1.....	34
A.4.2 Ausbreitungsklasse AK2.....	34
A.4.3 Ausbreitungsklasse AK6.....	35
A.5 Bestimmung des Windrichtungsbereiches zur Berechnung der mittleren Stundenfracht ...	36
A.6 Besondere Situation in Ausbreitungsklasse AK1 am Messpunkt 12 (Elsdorf-Berrendorf)....	37

1 Einleitung

Die messtechnische Ermittlung von diffusen Emissionen ist ein bekanntes Problem, für dessen Lösung sich je nach den Randbedingungen direkte und indirekte Methoden etabliert haben (VDI 2015b, Kapitel 6). Den Stand der Technik zur messtechnischen Bestimmung diffuser Feinstaubemissionen beschreibt VDI (2015c) in Verbindung mit VDI (2005). Direkte Methoden beruhen auf der Messung jeweils eines Volumenstromes und einer Konzentration in repräsentativen Teilflächen der zu beurteilenden Emissionsquelle (VDI 2005, Abschnitt 6.1). Bei Austrittsflächen von 100 m² und mehr wird von einer inhomogenen Verteilung der Emissionsmassenströme über den Messquerschnitt ausgegangen, weshalb der Messquerschnitt in mehrere Teilflächen mit einer jeweils möglichst gleichmäßigen Strömungsverteilung aufgeteilt wird, deren Volumenströme und Konzentrationen einzeln gemessen werden (VDI 2015c, Abschnitt 5.8). Für die Quelle Tagebau sieht VDI (2015c, Tabelle 1) dagegen nur die Verwendung indirekter Methoden vor, also von Immissionsmessungen an mehreren Messpunkten in Luv und Lee des Tagebaus in Verbindung mit Ausbreitungsmodellierung und Quelltermrückrechnung (VDI 2015c, Abschnitte 5.4, 5.7 und 5.8). Mit einer entsprechenden Methode bestimmte U. S. EPA (1998) Emissionsfaktoren für Kohletagebaue. Eine aktuellere Anwendung der Methode nach den Vorgaben von VDI (2015c) mit fortgeschrittenen Windfeld- und Ausbreitungsmodellen ist in VGB (2011) dokumentiert.

Tagebaue beeinflussen das Windfeld durch ihre komplexe Geländestruktur. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle, die erfolgreich nach VDI (2017b) evaluiert wurden, können das Windfeld über einer solchen Struktur realistisch beschreiben. Dies wird unter VDI (2017b) in Testfall E6 nachgewiesen, der die Orographie der Halde Sophienhöhe und des daneben befindlichen Tagebaus Hambach im Bezugsjahr 1989 verwendet. Mehrere erfolgreich nach VDI (2017b) evaluierte Windfeldmodelle haben sich in der gutachterlichen Praxis bewährt. Auch ihre fachgerechte Anwendung ist in einer Richtlinie (VDI 2015a) beschrieben.

Das von Vaupel (2018) an der BU Wuppertal entwickelte Bilanzierungsverfahren beruht wie die etablierten indirekten Methoden zur Bestimmung diffuser Feinstaubemissionen auf Immissionsmessungen in Luv und Lee der Quelle, ersetzt jedoch die iterative Quelltermrückrechnung mit einem geeigneten und validierten Ausbreitungsmodell durch eine Methode, die auf der im Folgenden skizzierten Annahme beruht.

DIN (2008a) enthält Anforderungen an die Messung von Emissionen aus stationären Quellen, deren Abgasströme in Abgaskanälen (z. B. in Kaminen) *gefasst* werden. In einem hinreichend langen, geraden Abschnitt eines Abgaskanals können nach DIN (2008a) zwischen einer Einlaufstrecke von mindestens fünf hydraulischen Durchmessern und einer Auslaufstrecke von zwei hydraulischen Durchmessern Strömungsverhältnisse und Emissionskonzentrationen erwartet werden, die über einen *Messquerschnitt* homogen sind. Außerhalb des Abgaskanals können dagegen keine Emissionen auftreten. Gemäß der von Vaupel (2018) postulierten Annahme kann bei einem Tagebau eine analoge, innerhalb eines *Bilanzierungsquerschnitts* homogene und auf diesen beschränkte Konzentrationsverteilung auch *ohne Fassung* der Abluft in einem geschlossenen Kanal vorausgesetzt werden. Der Emissionsmassenstrom kann nach dieser Annahme ohne iterative Quelltermrückrechnung durch Konzentrationsmessung an einem beliebigen Punkt des *Bilanzierungsquerschnitts* direkt bestimmt werden. Diese Annahme setzt also für den Emissionsmassenstrom eines Tagebaus, der nach VDI (2015c) selbst für direkte Methoden zur Ermittlung *diffuser* Emissionen nicht hinreichend definiert und zu inhomogen ist, wohldefinierte und weitgehend homogene Verhältnisse wie in einem geraden Abgaskanal voraus.

Vaupel (2018) stützt seine Massenbilanz auf eine eigene Interpretation eines Ansatzes der U. S. EPA (1995). In deren empirischer Grundlage (Perry et al. 1994) ist Vaupels Annahme über die

Konzentrationsverteilung in einem Bilanzierungsquerschnitt jedoch in der horizontalen Dimension nur ein Spezialfall und in der vertikalen Dimension nicht untersucht. Daher wird im Folgenden mit VDI (2015c) davon ausgegangen, dass die Konzentrationsverteilung von Feinstaub am Rand eines Tagebaus a priori unbekannt ist und nur mithilfe geeigneter Windfeld- und Ausbreitungsmodelle mit einer für die Emissionsbilanzierung hinreichenden Genauigkeit berechnet werden kann.

Aus diesem Grund wurde ein Sachverständigengutachten vom UBA beauftragt, das mit Modellen auf dem aktuellen Stand der Modellierungstechnik PM₁₀-Austräge aus dem Tagebau im Zustand des Jahres 2013 berechnet. Mit dessen Hilfe soll das Bilanzierungsverfahren so modifiziert werden, dass seine Ergebnisse in der geforderten Übereinstimmung mit etablierten Ausbreitungsmodellen stehen.

Im Folgenden wird auf Grundlage des Verfahrens der Richtlinie VDI (2015c) und einjähriger Messungen ein dimensionsloser Emissionsfaktor (Masse emittierten Feinstaubes pro Masse geförderter Braunkohle) ermittelt. Solange sich Bergbau- und Emissionsminderungstechniken nicht ändern, können Emissionsbilanzen auf Grundlage der Braunkohlenförderungen und des Emissionsfaktors auch ohne begleitende Immissionsmessungen erstellt werden. Dies gilt insbesondere auch rückwirkend.

Zunächst wird die Implementierung des Modells nach Vaupel überprüft (Abschnitt 2) und anschließend mit dem Sachverständigengutachten abgeglichen (Abschnitt 3). Wenn das modifizierte Bilanzierungsverfahren nach Vaupel in Übereinstimmung mit den etablierten Modellen steht, kann es die Grundlage für die Ermittlung des Emissionsfaktors bilden (Abschnitt 4).

2 Überprüfung und Korrektur des Excel-Modells nach Vaupel

Das von Vaupel entwickelte Bilanzierungs-Werkzeug wurde dem Umweltbundesamt von der RWE Power AG mit den Daten für den Tagebau Hambach für das Jahr 2013 zur Verfügung gestellt (Gödde 2020). Dieses Werkzeug ist eine Excel-Implementierung des Modells aus der Dissertationsschrift von Vaupel (2018). Das Ergebnis des Modells ist der berechnete PM₁₀-Austrag aus dem Tagebau Hambach für das betrachtete Jahr 2013.

Das Bilanzierungs-Werkzeug verwendet stündliche meteorologische Daten, unter anderem die Ausbreitungsklasse. Die Jahreszeitreihe der Ausbreitungsklasse war ursprünglich von Vaupel mit einem weiteren Excel-Werkzeug auf Grundlage von VDI (2017a) und stündlicher Windmessungen und Wolkenbeobachtungen der DWD-Station Düsseldorf aus dem Jahr 2013 erzeugt worden. Da die Ausbreitungsklassen an verschiedenen Stunden dieser Jahreszeitreihe nicht plausibel erschienen, wurde das Excel-Werkzeug zur Bestimmung der Ausbreitungsklassen mit Hilfe des Testdatensatzes der Richtlinie VDI (2017a) überprüft. Dabei zeigte sich, dass das Werkzeug einzelne Fehler enthielt, die im Anschluss korrigiert wurden (vgl. Anhang A.1). Mit dem korrigierten Excel-Werkzeug wurden die Ausbreitungsklassen auf Grundlage stündlicher Windmessungen der LANUV-Messstation Niederzier in Verbindung mit stündlichen Wolkenbeobachtungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr an der nahegelegenen Station Nörvenich (Flugplatz) aus dem Jahr 2013 berechnet, um möglichst repräsentative Daten für den Tagebau Hambach zu erhalten.

Die Excel-Implementierung des Bilanzierungsmodells ist in 16 Arbeitsblätter unterteilt, die unterschiedlich viele, bis zu 346 Spalten enthalten. Verglichen mit einem Computerprogramm in einer klassischen Programmiersprache entspricht ein Arbeitsblatt der Excel-Datei einer Funktion bzw. einem Unterprogramm. Eine Spalte eines solchen großen Arbeitsblatts entspricht einer Programmzeile in einer Funktion bzw. einem Unterprogramm. Diese großen Arbeitsblätter sind zusätzlich zu den Spalten in Zeilen unterteilt, die jeweils einer Stunde eines Schaltjahres entsprechen,

was zusammen mit einigen Kopfzeilen zu knapp 8.800 Zeilen führt. Die Excel-Datei hat eine Größe von etwa 100 MB.

Bei der Überprüfung des Excel-Modells wurden vereinzelt fehlerhafte Bezüge, fehlende Koeffizienten in Formeln und falsche Formelumsetzungen festgestellt. Diese wurden korrigiert und die so gewonnenen Daten wurden für den anschließenden Vergleich mit dem Sachverständigengutachten (siehe Abschnitt 3) herangezogen. Anhang A.2 enthält eine Aufstellung der Tabellenblätter und Spalten des Excel-Modells sowie der korrigierten Fehler.

3 Vergleich der Modellergebnisse mit den Ergebnissen des Sachverständigengutachtens

3.1 Kernelemente des Sachverständigengutachtens

In dem vom UBA beauftragten Sachverständigengutachten berechnete das Ingenieurbüro iMA mit Modellen auf dem aktuellen Stand der Modellierungstechnik PM₁₀-Austräge aus dem Tagebau Hambach im Zustand des Jahres 2013 für ausgewählte meteorologische Situationen (Hasel und Nielinger 2019). Die Rechnungen verwenden das in der TA Luft (2021) vorgeschriebene Ausbreitungsmodell für Stäube, das auf VDI (2000) beruht und nach dieser VDI-Richtlinie verifiziert ist. Nach den Vorgaben der TA Luft für steiles Gelände werden im Gutachten außerdem die Verfahrensregeln nach VDI (2015a) beachtet und ein Windfeldmodell verwendet, das den Anforderungen von VDI (2017b) entspricht. Die iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG ist durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkKS) nach DIN (2018) für Immissionsprognosen nach TA Luft akkreditiert.

Ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell des Tagebaus Hambach im Jahr 2013 (Gödde 2019), der zugehörige Verlauf der Tagebauoberkante (Gödde und Thelen 2019a) und der Umrisse der Teilbereiche des Tagebaus (Gödde und Thelen 2019b, vgl. Tabelle 1) wurden von der RWE Power AG für das Sachverständigengutachten bereitgestellt.

Das Gutachten liefert – wie das Excel-Modell von Herrn Vaupel – den Zusammenhang zwischen einer am Rand des Tagebaus gemessenen PM₁₀-Konzentration und der ausgetragenen PM₁₀-Fracht in der betrachteten Situation. Das Gutachten berechnete PM₁₀-Austräge für die Ausbreitungsklassen I, II, III/1 und V nach Klug/Manier (im Folgenden als AK1, AK2, AK3 und AK6 bezeichnet) sowie jeweils 8 Windrichtungen. Die Modellrechnungen des Gutachtens lieferten Ergebnisse der Form

$$\left(\frac{c}{Q - D} \right)_{d,i,j,k} \quad (1)$$

in der Einheit Sekunden pro Kubikmeter, mit der PM₁₀-Konzentration c , berechnet für die Messstation i , verursacht von einer – angenommenen – Emission Q aus der Quelle j (vgl. Tabelle 1) des Tagebaus und korrigiert um die trockene Deposition D von PM₁₀ innerhalb des Tagebaus. Der Index d bezeichnet die Windrichtung und der Index k die Ausbreitungsklasse, für die die Rechnung durchgeführt wurde. Als PM₁₀-Austrag aus dem Tagebau wird die Emission Q im Tagebau abzüglich der berechneten Deposition D im Tagebau interpretiert, also die Differenz $Q - D$. Das Sachverständigengutachten stellt also für viele verschiedene Situationen jeweils einen Zusammenhang zwischen einer angenommenen PM₁₀-Emission im Tagebau und einer daraus mit einem Ausbreitungsmodell berechneten PM₁₀-Konzentration am Rand des Tagebaus her. Wird in einer solchen Situation eine tatsächliche PM₁₀-Konzentration an der Station i am Rand des Tagebaus gemessen, lässt sich die tatsächliche Emission im Prinzip berechnen, indem die gemessene Konzentration durch den Wert der Gleichung (1) geteilt wird. Die konkrete Berechnung, auch für andere als im Sachverständigengutachten vorausgesetzte Windgeschwindigkeiten, wird in Abschnitt

3.4 vorgestellt. Durch Vergleich der Ergebnisse des Excel-Modells mit den Ergebnissen des Sachverständigengutachtens für die Stunden des Jahres 2013, an denen die meteorologischen Randbedingungen des Sachverständigengutachtens gegeben waren, wurden Korrekturfaktoren abgeleitet.

Da im Sachverständigengutachten verschiedene Quellen im Tagebau zur Modellierung der PM₁₀-Austräge verwendet wurden, mussten zunächst diejenigen Quellen identifiziert werden, die den größten Einfluss auf die gemessenen Konzentrationen haben. Dies wurde gemäß DIN (2008b, 8.2.4) mit Hilfe einer Regressionsanalyse (schrittweise multiple Regression) ermittelt. Für das Regressionsmodell wurden die Quellen 5, 6, 7, 12, 13 und 14 verwendet. Quelle 0 diente als Vergleich (siehe Tabelle 1). Die Lage der Quellen im Tagebau zeigt Abbildung 1.

Tabelle 1: Übersicht der Quellen im Tagebau, die im Sachverständigengutachten verwendet wurden.

Quelle	Erläuterungen
0	Summe aller Quellen innerhalb der Tagebauoberkante
1	Absetzerseite Bänder 1-3 Ost
2	Absetzerseite Bänder 1-3 West
3	Absetzerseite Bänder 3-5 Ost
4	Absetzerseite Bänder 3-5 West
5	Absetzerseite Bänder
6	Außenkippe Bänder 5-7
7	Baggerseite Bänder
8	Baggerseite Bänder 1-3 Ost
9	Baggerseite Bänder 1-3 West
10	Baggerseite Bänder 3-5 Ost
11	Baggerseite Bänder 3-6 West
12	Bahnverladung
13	Bandsammelpunkt + Bänder
14	Kohleflöz

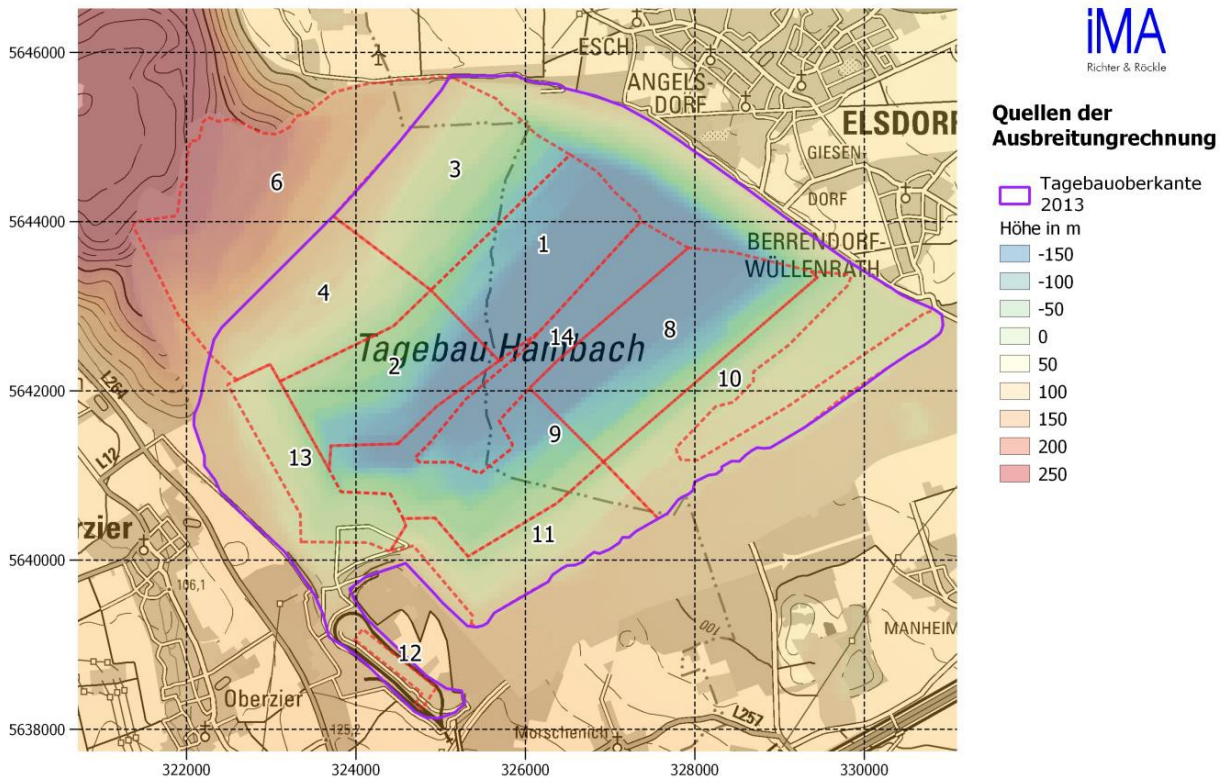


Abbildung 1: Lage der Quellen des Tagebaus im Modell des Sachverständigengutachtens.

Außer den Quellen wurden im Modell des Sachverständigengutachtens auf einem Umkreis um den Tagebau zwölf fiktive Messpunkte festgelegt, an denen die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und die PM₁₀-Konzentration ausgelesen wurde (Abbildung 2).

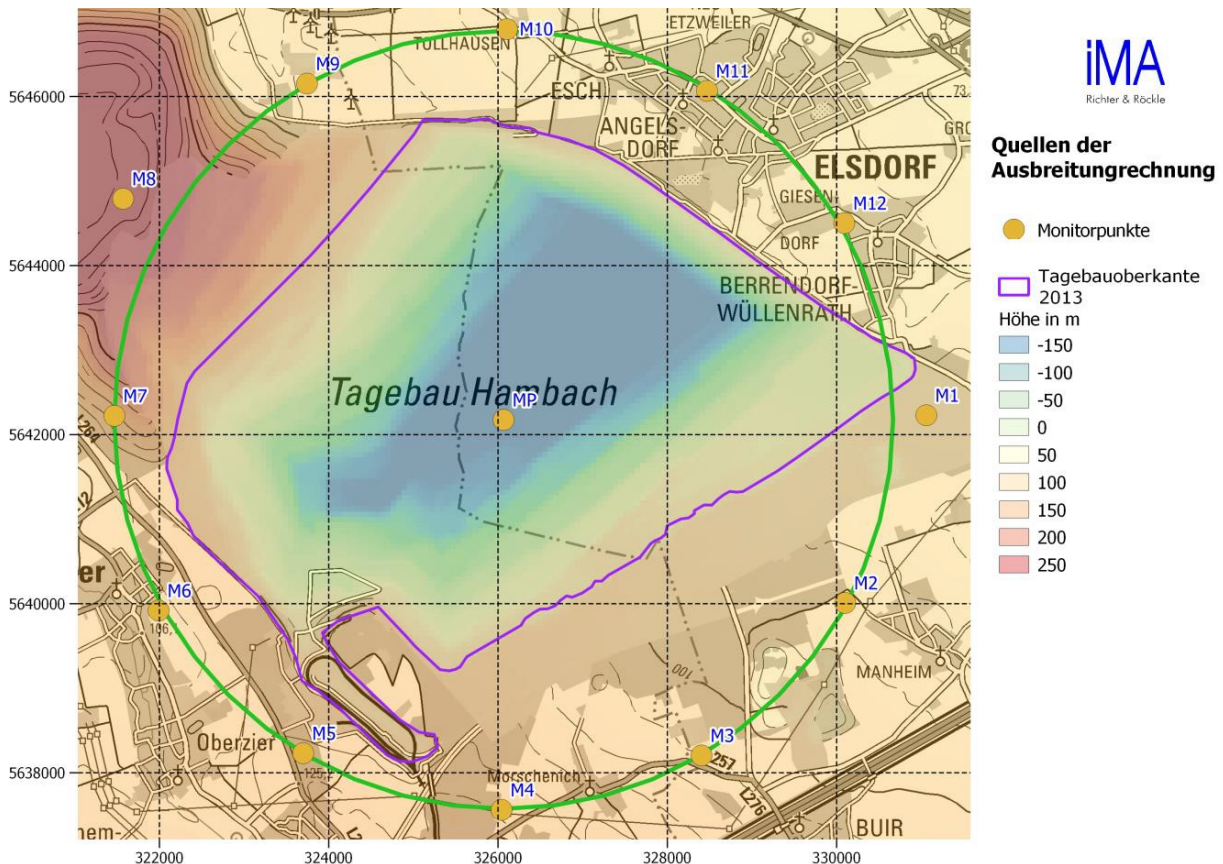


Abbildung 2: Tagebau Hambach im Modell des Sachverständigengutachtens mit zwölf fiktiven Messpunkten. Messpunkt bzw. Monitorpunkt M6 liegt an der Position der LANUV-Messstation Niederzier, Messpunkt M12 an der Position der LANUV-Messstation Elsdorf-Berrendorf.

3.2 Regressionsmodell zur Ermittlung der Anteile einzelner Quellen am PM₁₀-Austrag im Modell des Sachverständigengutachtens

Die Konzentrationsdifferenz $c_{h,i}$ zur Jahresstunde h zwischen der PM₁₀-Konzentration an der Messstation i in Lee des Tagebaus (je nach Windrichtung Niederzier oder Elsdorf-Berrendorf) und der PM₁₀-Konzentration an der gegenüberliegenden Messstation in Luv des Tagebaus ist – erstens – die Messgröße, aus der der PM₁₀-Austrag aus dem Tagebau berechnet wird. Aus dem Sachverständigengutachten liegen – zweitens – berechnete Beziehungen zwischen den Emissionsraten e_j (in der Dimension Masse pro Zeit) einzelner Tagebauflächen (bzw. Quellen) j (siehe Tabelle 1) und der Konzentrationsdifferenz $c_{h,i}$ vor, siehe Gleichung (2). Es ist jedoch a priori nicht bekannt, mit welchen Anteilen die einzelnen Quellen im Tagebau zur Konzentrationsdifferenz beitragen. Um diese Anteile statistisch aus einer großen Zahl von Konzentrationsdifferenzen zu ermitteln, wird – drittens – folgendes multiple lineare Regressionsmodell verwendet:

$$c_{h,i} = \sum_j \frac{e_j}{u_{h,i} A_{h,i,j}} w_{h,i,j} \quad (2)$$

Neben der Messgröße $c_{h,i}$ und der mit der Regressionsanalyse zu ermittelnden Regressionsparametern e_j gehen folgende weiteren Größen in das Regressionsmodell ein:

- $u_{h,i}$, der Messwert der Windgeschwindigkeit zur Stunde h an der Messstation i ,

- $A_{h,i,j}$, eine aus dem Sachverständigengutachten abgeleitete Rechengröße mit der Dimension Länge² für die Windrichtung $d_{h,i}$ an der Messstation i und die Ausbreitungsklasse k_h zur Jahresstunde h definiert als

$$A_{h,i,j} = \frac{1}{u_{d,i,k} \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j,k}} \quad (3)$$

- $w_{h,i,j}$, ein dimensionsloser Koeffizient, der die Ergebnisse des Sachverständigengutachtens auf Verluste durch nasse Deposition beim Transport von der Fläche j zur Messstation i korrigiert.

Die Größe $u_{d,i,k}$ im Nenner von Gleichung (3) bezeichnet den Betrag der im Modell an der Messstation i bei Windrichtung d in Ausbreitungsklasse k in einer Modellhöhe von 10 m berechneten Windgeschwindigkeit, im Sachverständigengutachten als FF bezeichnet. Dort und beim Ausdruck $\left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j,k}$ (siehe auch Gleichung (1)) ist zu beachten, dass die Windrichtung d nicht die im Sachverständigengutachten so genannte Anströmrichtung bezeichnet, sondern die Windrichtung, die sich aus den u - und v -Komponenten im Windfeldmodell an der Messstation i bei Ausbreitungsklasse k für eine bestimmte, in der Regel davon abweichende Anströmrichtung berechnet:¹

$$d = \text{REST}(\text{GRAD}(\text{ARCTAN2}(-v_{i,k}; -u_{i,k})); 360) \quad (4)$$

Bei der Berechnung des Koeffizienten $w_{h,i,j}$ wird vereinfachend angenommen, dass der Staub auf dem kürzesten Weg mit der gemessenen Windgeschwindigkeit $u_{h,i}$ transportiert wird. Die mittlere kürzeste Entfernung zwischen Fläche j und Messstation i wird mit $r_{i,j}$ bezeichnet. Der Verlust durch nasse Deposition wird in Anlehnung an VDI (2006) mit der Parametrisierung der TA Luft (2021, Tabelle 14) für Staub der Korngrößenklasse 2 berechnet:

$$w_{h,i,j} = e^{-t\Lambda} \quad (5)$$

$$t = \frac{r_{i,j}}{u_{h,i}} \quad (6)$$

$$\Lambda = \lambda \left(\frac{I}{I_0} \right)^\kappa \quad (7)$$

mit der Transportzeit t , der Auswaschrage Λ , der Niederschlagsintensität I , I_0 gleich 1 mm/h, dem Auswaschfaktor $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ und dem Auswaschexponenten $\kappa = 0,8$.

Die Regressionsanalyse sollte ermitteln, wie stark der Beitrag der einzelnen Tagebauflächen (Quellen) zu den erfassten Emissionen ausfällt. Deshalb wurden nur die Situationen in der Regressionsanalyse berücksichtigt, in denen nach den Ergebnissen des Sachverständigengutachtens mindestens 5 der 6 Quellen beitragen.

Bei einer normalen multiplen Regression werden für alle unabhängigen Variablen Regressionsparameter (hier: Emissionsraten e_j) geschätzt. Manche Variablen tragen allerdings nicht signifikant zum Ergebnis eines Regressionsmodells bei. Um nicht signifikante Variablen automatisch auszuschließen, wurde gemäß DIN (2008b, 8.2.4) die Methode der sogenannten schrittweisen multiplen Regression verwendet. Für diese Berechnungen wurde in der Programmiersprache R die *lm*-Funktion des Pakets (packages) „tidyverse“ verwendet. Die Skripte können auf Nachfrage zur Verfügung gestellt werden.

¹ In Excel-Syntax

Von einer großen Zahl denkbarer Regressionsmodelle wurden in einem mehrstufigen Auswahlverfahren immer mehr verworfen, bis schließlich die am Ende des folgenden Abschnitts 3.3 genannten drei Regressionsmodelle bzw. Regressionsgleichungen identifiziert waren. Am Anfang der Auswahl stand die Annahme, dass bei unterschiedlichen meteorologischen Situationen (stabile Schichtung der Atmosphäre in den Ausbreitungsklassen AK1 und AK2, neutrale Schichtung der Atmosphäre in der Ausbreitungsklasse AK3 und labile Schichtung der Atmosphäre bei AK6) die verschiedenen Quellen des Tagebaus (vgl. Tabelle 1) unterschiedlich stark zu den PM₁₀-Konzentrationen an den Messstationen Niederzier und Elsdorf-Berrendorf beitragen könnten. Außerdem wurde geprüft, wie gut die Regressionsmodelle die Konzentrationen nur an der Messstation Niederzier, nur an der Messstation Elsdorf-Berrendorf und gleichzeitig an beiden Messstationen reproduzieren können. Schließlich wurden zwei Datensätze der Konzentrationsdifferenz zwischen der Messstation in Lee und in Luv verwendet: im einen Datensatz alle Situationen, im anderen nur die Situationen, in denen wie erwartet in Lee eine höhere PM₁₀-Konzentration gemessen wurde als in Luv.

Dies führte zunächst auf 13 Kombinationen verschiedener atmosphärischer Schichtungen, berücksichtigter Messpunkte und berücksichtigter Konzentrationsdifferenzen. Außerdem standen drei verschiedene numerische Verfahren der schrittweisen Regression zur Verfügung: Vorwärtsauswahl, Rückwärtselimination und eine Kombination beider Verfahren, insgesamt in der ersten Übersicht also $13 \cdot 3 = 39$ Regressionsmodelle.

Es zeigte sich, dass das numerisch effizienteste Verfahren der Vorwärtsauswahl jeweils die gleichen Ergebnisse wie das komplexeste Verfahren (Kombination beider Methoden) lieferte, weshalb in der Folge nur noch die Vorwärtsauswahl verwendet wurde (bleiben 13 Regressionsmodelle). Einige dieser Modelle ordneten den beiden am weitesten außen liegenden Quellen, nämlich der Außenkippe (Quelle 6) und der Bahnverladung (Quelle 12) negative Emissionen zu. Um diese physikalisch nicht interpretierbaren Ergebnisse vermeiden zu können, wurden – außer den Modellen mit allen Quellen – Modelle ohne Quelle 6, Modelle ohne Quelle 12 und Modelle ohne beide Quellen (6 und 12) aufgesetzt. Dies ergab als Zwischenstand eine Auswahl von $13 \cdot 4 = 52$ Regressionsmodellen. Davon wurden alle Modelle mit negativ zugewiesenen Emissionen, alle Modelle, die nur Konzentrationen an einer der beiden Messstationen reproduzierten und – bei ähnlichen Modellen – die mit den kleineren Korrelationskoeffizienten verworfen, wonach 10 Regressionsmodelle übrigblieben, die eine eigene Regressionsgleichungs-Nummer erhielten: (R1) bis (R10).

Diese zehn Regressionsmodelle wurden der im folgenden Abschnitt 3.3 beschriebenen Qualitätssicherung unterzogen. Als aussichtsreiche Kandidaten verblieben im vorletzten Auswahlschritt:

Regressionsgleichung 1:

$$\begin{aligned}
 c_{h,i} \cdot \frac{u_{h,i}}{u_{d,i,k}} &= 1,0 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=14,k} \cdot w_{h,i,j=14} & (R1) \\
 &+ 1,1 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=5,k} \cdot w_{h,i,j=5} \\
 &+ 8,9 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=13,k} \cdot w_{h,i,j=13} & R^2 = 0,246
 \end{aligned}$$

Regressionsgleichung 2:

$$c_{h,i} \cdot \frac{u_{h,i}}{u_{d,i,k}} = 5,4 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=0,k} \cdot w_{h,i,j=0} \quad R^2 = 0,1459 \quad (R2)$$

Regressionsgleichung 3:

$$\begin{aligned} c_{h,i} \cdot \frac{u_{h,i}}{u_{d,i,k}} &= 1,3 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=14,k} \cdot w_{h,i,j=14} \\ &+ 1,7 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=13,k} \cdot w_{h,i,j=13} \\ &+ 1,6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=7,k} \cdot w_{h,i,j=7} \\ &+ 1,4 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=5,k} \cdot w_{h,i,j=5} \quad R^2 = 0,4234 \end{aligned} \quad (R3)$$

Regressionsgleichung 5:

$$\begin{aligned} c_{h,i} \cdot \frac{u_{h,i}}{u_{d,i,k}} &= 1,3 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=13,k} \cdot w_{h,i,j=13} \\ &+ 2,5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=12,k} \cdot w_{h,i,j=12} \quad R^2 = 0,3608 \end{aligned} \quad (R5)$$

Regressionsgleichung 9:

$$c_{h,i} \cdot \frac{u_{h,i}}{u_{d,i,k}} = 3,2 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{c}{Q-D} \right)_{d,i,j=13,k} \cdot w_{h,i,j=13} \quad R^2 = 0,4365 \quad (R9)$$

Die Zahlenwerte unmittelbar rechts von den Gleichheitszeichen sind die vom Regressionsmodell ermittelten Regressionsparameter e_j aus Gleichung (2). Sie haben die Einheit eines Massenstroms, nämlich Mikrogramm pro Sekunde.

Die Regressionsgleichungen (R1) bis (R3) ergeben sich mit der beschriebenen Auswahlmethode aus dem gesamten Datensatz, also unter Berücksichtigung aller Ausbreitungsklassen (AK1, AK2, AK3 und AK6), Gleichung (R5) wurde allein für die Ausbreitungsklasse AK3 ermittelt und (R9) allein für Ausbreitungsklasse AK6.

3.3 Qualitätssicherung: Überprüfung und Auswahl der Regressionsmodelle

Um die Genauigkeit der einzelnen Regressionsmodelle zu überprüfen, wurde die an der je nach Windrichtung in Luv liegenden Station Niederzier (Messpunkt 6) oder Elsdorf-Berrendorf (Messpunkt 12) gemessene Konzentration als Hintergrundkonzentration verwendet. Zu dieser Hintergrundkonzentration wurde die am jeweils gegenüber in Lee liegenden Messpunkt mit dem Regressionsmodell berechnete Konzentration addiert und die Summe beider Konzentrationen mit dem tatsächlich an der leeseitigen Station gemessenen Wert verglichen.

Dies wird am Beispiel der Ausbreitungsklasse AK3 und dem Messpunkt 6 (Station Niederzier) veranschaulicht. Abbildung 3 zeigt die graphische Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationen und der mittels Regressionsgleichung (R3) berechneten Konzentrationen.

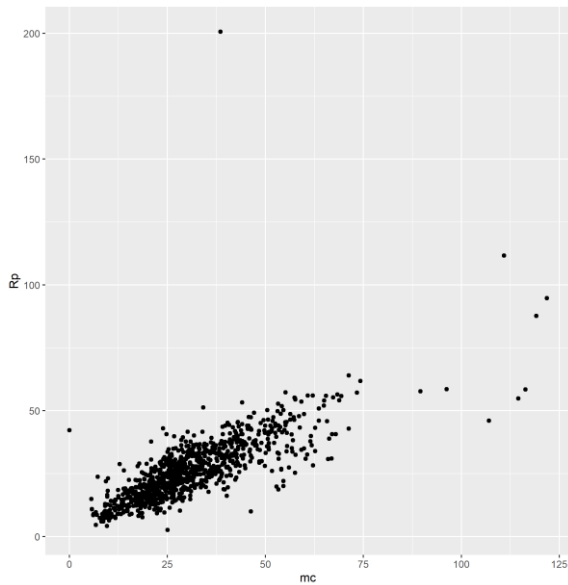


Abbildung 3: Mittels Regressionsgleichung (R3) berechnete PM_{10} -Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, y-Achse) versus gemessene PM_{10} -Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, x-Achse) am Messpunkt 6 (Niederzier) in der Ausbreitungsklasse III/1 (AK3).

Um die Streuung in der Darstellung zu eliminieren und auch schwächere Einflussfaktoren zu identifizieren, wurde zusätzlich eine Doppelsummenanalyse durchgeführt. Das statistische Verfahren der Doppelsummenanalyse dient der Identifizierung von Inhomogenitäten von Messreihen. Hierzu werden die Daten der gemessenen Konzentration und der mittels Regression berechneten Konzentration schrittweise für jeweils ein Wertepaar aus Messung und Rechnung aufsummiert und graphisch gegeneinander aufgetragen. Die Reihenfolge der Daten wird im folgenden Beispiel durch die Windrichtung bestimmt, um Auffälligkeiten in Bezug zur Windrichtung erfassen zu können.

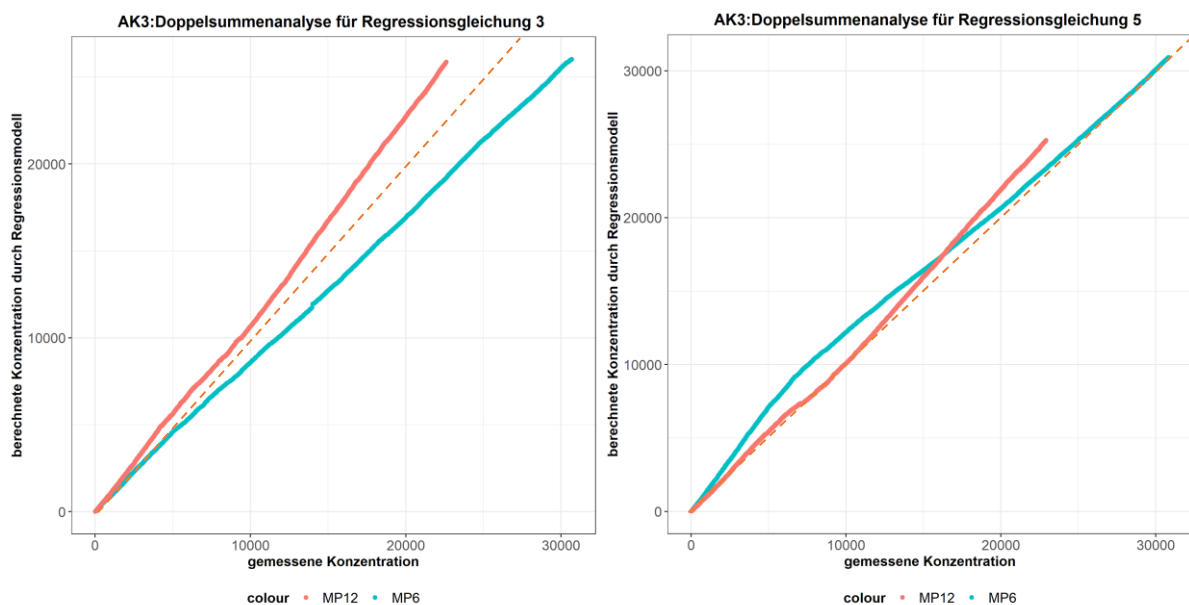


Abbildung 4: Doppelsummenanalyse für berechnete PM_{10} -Konzentrationen (Teilsommen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wie im Text beschrieben) an beiden Messpunkten, Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf) in rot und Messpunkt 6 (Station Niederzier) in blau. Links Berechnung mittels Regressionsgleichung (R3), rechts für Regressionsgleichung (R5). Die Wertepaare sind nach der Windrichtung im Uhrzeigersinn angeordnet. Die gestrichelte Gerade hat die Steigung 1.

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, unterschätzt das in der linken Bildhälfte gezeigte Regressionsmodell (R3) die Konzentrationen an Messpunkt 6 (Niederzier: die blaue Kurve hat eine Steigung < 1), während es die Werte an Messpunkt 12 überschätzt (Elsdorf-Berrendorf: rote Kurve mit Steigung > 1). Regressionsgleichung (R5) zeigt eine geringe Überschätzung für Messpunkt 12 (Elsdorf-Berrendorf: Steigungen der roten Kurve nur im rechten Teil des Diagramms leicht > 1), für Messpunkt 6 (Niederzier, blaue Kurve) werden die gemessenen Werte in den Windrichtungen mit kleinen Winkeln leicht überschätzt. Die Darstellungen der Doppelsummenanalyse zu den übrigen Ausbreitungsklassen sind im Anhang A.3 aufgeführt.

Grundlage für die Auswahl des Regressionsmodells bildeten folgende Kriterien:

- Hoher Korrelationskoeffizient
- Beste Annäherung an die Gerade mit Steigung 1 in der Doppelsummenanalyse
- Keine starken Abweichungen für bestimmte Windrichtungen
- Ähnlicher Kurvenverlauf für beide Messpunkte
- Wenn möglich eine gemeinsame Gleichung für mehrere Ausbreitungsklassen
- Niedriger Korrekturfaktor im Kernwinkelbereich (siehe Abschnitt 3.5)

Nach Berechnung und Darstellung aller Doppelsummenanalysen wurden für die verschiedenen Ausbreitungsklassen folgende Regressionsgleichungen zur weiteren Berechnung ausgewählt:

- AK1: Regressionsgleichung (R3)
- AK2: Regressionsgleichung (R3)
- AK3: Regressionsgleichung (R5)
- AK6: Regressionsgleichung (R9)

3.4 Berechnung einer Referenzhöhe z_{ref} für den Vergleich mit der Höhe z_{exit} des Bilanzierungsquerschnitts aus dem Excel-Modell

Das Excel-Modell berechnet den Massenstrom \dot{m}_h des PM_{10} -Austrags aus dem Tagebau zur Stunde h an der Messstation i in Lee des Tagebaus nach der Gleichung

$$\dot{m}_h = c_{h,i} \cdot \langle u \rangle_{i,k} \cdot L_d \cdot z_{\text{exit}}(k), \quad (8)$$

siehe Vaupel (2018, Gleichung (7.20)). Dabei ist $c_{h,i}$ wie in Gleichung (2) die Differenz zwischen den PM_{10} -Konzentrationen an der Station i in Lee des Tagebaus und an der gegenüberliegenden Station in Luv des Tagebaus. Als Windgeschwindigkeit $\langle u \rangle_{i,k}$ wird der Mittelwert über das vertikale Windprofil bis zur Höhe z_{exit} des Bilanzierungsquerschnitts angesetzt. Das Windprofil wird nach VDI (2017c) für die Ausbreitungsklasse k aus dem Messwert der Windgeschwindigkeit an der Messstation i berechnet. L_d ist die nach Vaupel (2018) an der Tagebauoberkante gemessene Länge des Bilanzierungsquerschnitts bei Windrichtung d .

Somit verwendet das Excel-Modell zur Berechnung des Massenstroms auf der rechten Seite von Gleichung (8) drei im Wesentlichen gemessene Größen (die Konzentrationsdifferenz, die Windgeschwindigkeit und als Länge den Abstand zwischen den Tagebauoberkanten jeweils in Luv und Lee) sowie die berechnete Höhe z_{exit} , für die nach Vaupel (2018, Gleichungen (7.13), (7.17) und (7.18)) gilt:

$$z_{\text{exit}}(k) = \sqrt{\left(\frac{V_G}{4,3 \cdot L_d \cdot B_d}\right)^2 + \sigma_z^2(B_d, k)}, \quad (9)$$

mit dem Grubenvolumen V_G des Tagebaus und seiner Breite B_d in Windrichtung. Der Ausbreitungsparameter σ_z wird nach VDI (2017c) als Funktion der Tagebaubreite B_d und der Ausbreitungsklasse k berechnet.

Dass das Produkt der Gleichung (8) aus den drei Messgrößen und der Rechengröße z_{exit} den PM_{10} -Austrag aus dem Tagebau richtig beschreibt, ist die zentrale Hypothese von Vaupel (2018), die hier durch einen Vergleich mit dem Sachverständigengutachten überprüft werden soll. Zu diesem Zweck wird Gleichung (8) umgestellt, um eine Referenzhöhe z_{ref} zu berechnen,

$$z_{\text{ref}}(k) = \frac{\dot{m}_h}{c_{h,i} \cdot \langle u \rangle_{i,k} \cdot L_d}, \quad (10)$$

indem die Konzentrationsdifferenz im Nenner von Gleichung (10) nach Gleichung (2) mit dem für die Ausbreitungsklasse k verwendeten Regressionsmodell aus Abschnitt 3.3 berechnet wird:

$$c_{h,i} = \sum_j \frac{e_j}{u_{h,i} A_{h,i,j}} w_{h,i,j} \quad (11)$$

Außerdem wird auch der Emissionsmassenstrom im Zähler von Gleichung (10) mit den Regressionskoeffizienten aus Gleichung (2) ausgedrückt,

$$\dot{m}_h = \sum_j e_j \cdot w_{h,i,j}, \quad (12)$$

mit dem Ergebnis

$$z_{\text{ref}}(k) = \frac{\sum_j e_j^R \cdot w_{h,i,j}^R}{\sum_j \frac{e_j^R \cdot w_{h,i,j}^R}{A_{h,i,j}^S}} \cdot \frac{u_{h,i}^M}{\langle u \rangle_{i,k}^E \cdot L_d^E} \quad (13)$$

Um daran zu erinnern, woher die einzelnen Terme der Gleichung (13) stammen, wurden sie zusätzlich mit oberen Indizes versehen: E für Excel-Modell, M für Messung, R für Regressionsmodell und S für Sachverständigengutachten. Als Windrichtungen d wurden zur Bestimmung der Referenzhöhe schlussendlich nur die Windrichtung von der Station Niederzier zur Station Elsdorf-Berrendorf und die Gegenrichtung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.5). Für diese Windrichtungen wurde in Gleichung (13) der feste Zahlenwert $L_d^E = 5690$ m verwendet.

Für die ausgewählten meteorologischen Situationen, also für die jeweils gleiche Ausbreitungsklasse und gleiche Windrichtung, wurde nun der Quotient aus z_{ref} und z_{exit} gebildet und als Korrekturfaktor weiterverwendet.

3.5 Bestimmung der Kernwindrichtungsbereiche zur Ermittlung der Korrekturfaktoren

Der Korrekturfaktor wird als Quotient aus z_{ref} und z_{exit} berechnet. Ein Korrekturfaktor 1 bedeutet perfekte Übereinstimmung zwischen dem Excel-Modell und dem Sachverständigengutachten. In der Ausbreitungsmodellierung gilt ein Unterschied bis zu maximal einem Faktor 2 als mögliches Merkmal für gute Übereinstimmung (Chang und Hannah 2004). Dieses Kriterium wurde auch in diesem Vergleich verwendet: In Situationen mit $0,5 < z_{\text{ref}}/z_{\text{exit}} < 2$ wurde auf eine Korrektur der Ergebnisse des Excel-Modells verzichtet, in den übrigen Situationen wurden die mit dem Excel-Modell berechneten PM_{10} -Austräge mit dem Korrekturfaktor multipliziert.

Zur weiteren Berechnung wird für jede Ausbreitungsklasse und jeden Messpunkt ein Kernwindrichtungsbereich benötigt. Das ist der Winkelbereich der Windrichtungen, in dem das Excel-

Modell in größter Übereinstimmung mit dem Sachverständigengutachten steht. Dieser Windrichtungsbereich soll zur Berechnung des mittleren Korrekturfaktors genutzt werden. Beispielhaft wird die Auswahl dieses Kernwindrichtungsbereiches an der Ausbreitungsklasse AK3 im Folgenden dargestellt. Die Abbildungen zu den übrigen Ausbreitungsklassen finden sich im Anhang A.4.

Für die Ausbreitungsklasse AK3 und den Messpunkt 6 (Station Niederzier, siehe Abbildung 5) zeigen die mit den vier Regressionsmodellen berechneten Korrekturfaktoren im Winkelbereich 62°–87° die geringsten Abweichungen vom Wert 1 (perfekte Übereinstimmung), weshalb dieser Winkelbereich als Kernwindrichtungsbereich festgelegt wurde. Die Grenzen eines Winkelbereichs wurden dabei folgendermaßen bestimmt: Im Sachverständigengutachten wurden die Windfelder mit äquidistanten Windrichtungen alle 30° initialisiert. Durch den Geländeeinfluss ergaben sich im Windfeldmodell jedoch lokal an den Messpunkten von dieser Initialisierung abweichende Windrichtungen, wobei die Abweichung an den einzelnen Messpunkten in den unterschiedlichen Ausbreitungsklassen unterschiedlich ausfiel. Für die Auswertung wurden die Grenzen eines Winkelbereichs festgelegt als Mittelwert zwischen den lokalen Windrichtungen an einem Messpunkt in jeweils zwei benachbarten² Windfeldern. Im Falle stark unterschiedlicher lokaler Windrichtungen in zwei benachbarten Windfeldern wurde der Kernwinkelbereich auf eine maximale Abweichung von 15° von der Windrichtung im jeweiligen Windfeld begrenzt. Der Winkelbereich 62°–87° am Messpunkt 6 entspricht einer Initialisierung des Windfeldmodells mit einer Anströmung aus 60°.

Für Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf) liegt der Kernwindrichtungsbereich der Ausbreitungsklasse AK3 bei 218°–245° (Abbildung 6), entsprechend einer Initialisierung mit einer Windrichtung aus 240°. In beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass das Excel-Modell nur für bestimmte Windrichtungen im guten Einklang mit dem Sachverständigengutachten steht. Abseits von diesen Windrichtungen liefert das Excel-Modell keine zuverlässigen Daten.

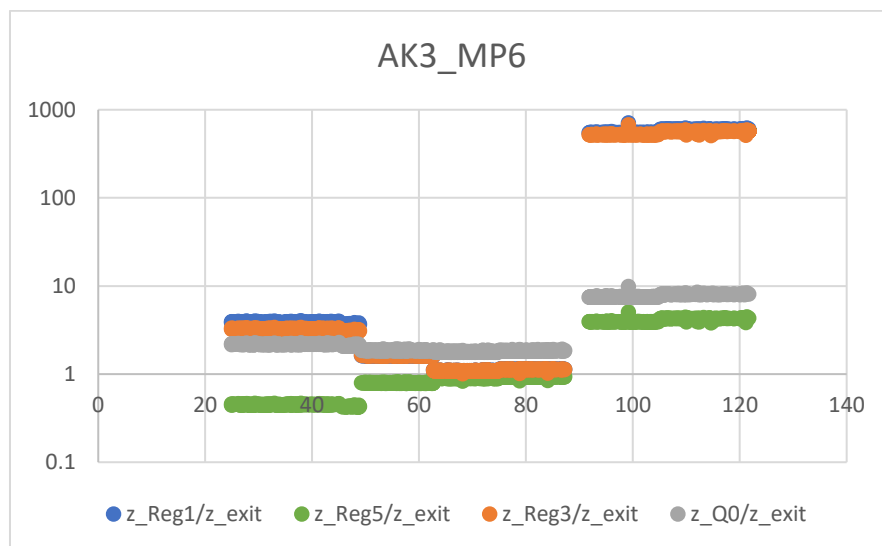


Abbildung 5: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) für die Windrichtungen (Grad, x-Achse) bei Ausbreitungsklasse AK3 am Messpunkt 6 (Station Niederzier). Zusätzlich zu der für diese Ausbreitungsklasse ausgewählten Regressionsgleichung (R5) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1), (R2) (entspricht in Tabelle 1 der Quelle 0) und (R3) dargestellt.

² Benachbarte Windfelder sind hier zwei Windfelder, die mit einer um 30° verschiedenen Windrichtung initialisiert wurden.

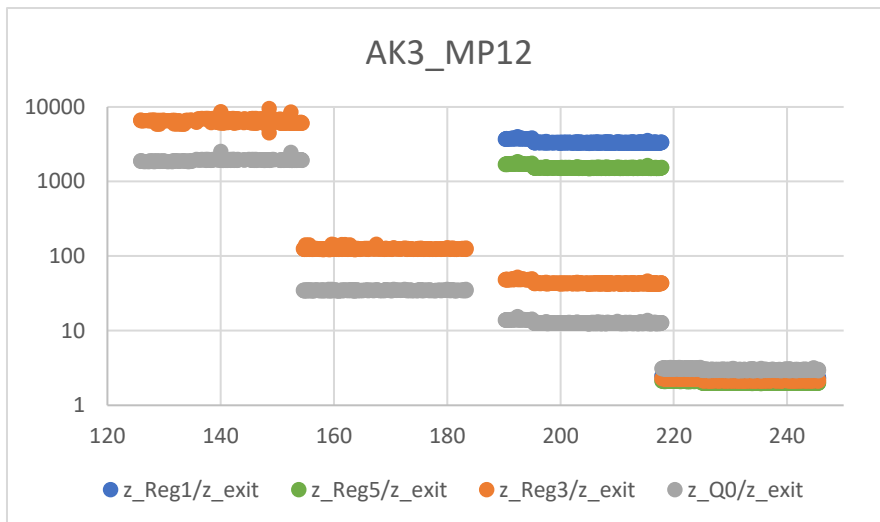


Abbildung 6: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) für die Windrichtungen (Grad, x-Achse) bei Ausbreitungsklasse AK3 am Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf). Zusätzlich zu der für diese Ausbreitungsklasse ausgewählten Regressionsgleichung (R5) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1), (R2) (entspricht in Tabelle 1 der Quelle 0) und (R3) dargestellt.

Für die so definierten Kernwindrichtungsbereiche wurde je Ausbreitungsklasse und Messpunkt von allen Korrekturfaktoren ein Mittelwert berechnet:

AK1, Messpunkt 6:	1,24	→ Korrekturfaktor < 2, keine Korrektur notwendig
AK1, Messpunkt 12:	37,22	→ Vorgehen scheint nicht anwendbar, Korrekturfaktor wird aus anderen Ausbreitungsklassen ermittelt
AK2, Messpunkt 6:	1,20	→ Korrekturfaktor < 2, keine Korrektur notwendig
AK2, Messpunkt 12:	2,06	→ Korrekturfaktor > 2, Korrekturfaktor muss angewandt werden
AK3, Messpunkt 6:	0,92	→ Korrekturfaktor < 2, keine Korrektur notwendig
AK3, Messpunkt 12:	2,04	→ Korrekturfaktor > 2, Korrekturfaktor muss angewandt werden
AK6, Messpunkt 6:	1,16	→ Korrekturfaktor < 2, keine Korrektur notwendig
AK6, Messpunkt 12:	3,52	→ Korrekturfaktor > 2, Korrekturfaktor muss angewandt werden

Für Messpunkt 6, also Bilanzen an der Messstation Niederzier, muss kein Korrekturfaktor verwendet werden. An diesem Messpunkt liegt der Quotient aus z_{ref} und z_{exit} für alle Ausbreitungsklassen unter dem Faktor 2, der als Kriterium für akzeptable Abweichungen herangezogen wurde.

Bei Messpunkt 12 liegt in der Ausbreitungsklasse 1 eine besondere Situation vor, in der die im Sachverständigengutachten berechneten Ausbreitungsfahnen der im Regressionsmodell berücksichtigten Quellen kaum erfasst werden, wenn das Windfeldmodell des Gutachtens mit einer Anströmung aus 240° oder aus 270° initialisiert wurde, obwohl ein Austrag stattfindet (siehe Abbildungen im Anhang A.6). Ausbreitungsrechnungen für die in dieser Situation vermutlich besser geeigneten Anströmrichtungen 300° und 330° waren im Sachverständigengutachten nicht beauftragt und durchgeführt worden. Aus diesem Grund fließen diese Daten nicht in die Korrekturfaktorermittlung ein. Auf Grund der besseren Datenlage in AK2 und AK3 wird der

Korrekturfaktor als gewichteter Mittelwert über die Ausbreitungsklassen AK2, AK3 und AK6 berechnet und im Anschluss für alle Ausbreitungsklassen am Messpunkt 12 angewandt.

Der mittlere Korrekturfaktor für den Messpunkt 12 beträgt 2,06.

4 Berechnung der korrigierten Jahresfracht für Hambach im Jahr 2013

4.1 Problem fehlender Messstationen

Der Vergleich des Sachverständigengutachtens mit dem Excel-Modell ergab zumindest für den Messpunkt 6 (Messstation Niederzier) und die passende Windrichtung, d. h. direkte Anströmung über den Tagebau, eine gute Übereinstimmung. Hier war keine Anwendung von Korrekturfaktoren notwendig. Anders liegt der Fall bei Messpunkt 12 (Messstation Elsdorf-Berrendorf), wo für alle Ausbreitungsklassen Abweichungen festgestellt wurden und ein Korrekturfaktor für das weitere Vorgehen ermittelt wurde.

Wie die Bestimmung der Kernwindrichtungsbereiche in Abschnitt 3.5 bereits vermuten lässt, erfasst das Excel-Modell mit seiner Luv- und Leemessung an den beiden Messstationen Niederzier und Elsdorf-Berrendorf jedoch nur bei passenden Windrichtungen den vollen PM_{10} -Austrag. Wenn der Wind aus einer anderen Richtung strömt, werden die PM_{10} -Austräge nicht genügend erfasst. Anschaulich zeigt dies Abbildung 7 mit einem Konzentrationsfeld aus dem Sachverständigengutachten für Emissionen auf der Baggerseite bei Ausbreitungsklasse AK3 und Windrichtung 180° . Obwohl ein Austrag stattfindet, wird dieser weder an Messpunkt 6 (Niederzier) noch 12 (Elsdorf-Berrendorf) erfasst. An Positionen im Norden des Tagebaus, die von dieser Staubfahne mit PM_{10} beaufschlagt werden, wurden keine Messungen durchgeführt.

Um diese Diskrepanz auszugleichen, wird auf Basis des Excel-Modells und falls notwendig mit dem Korrekturfaktor aus dem Sachverständigengutachten ein mittlerer PM_{10} -Austrag (Stundenfracht) berechnet (Abschnitt 4.2) und dieser auf die nicht idealen Windrichtungen angewandt (Abschnitt 4.3). Dies erfolgt wieder für jede Ausbreitungsklasse separat.

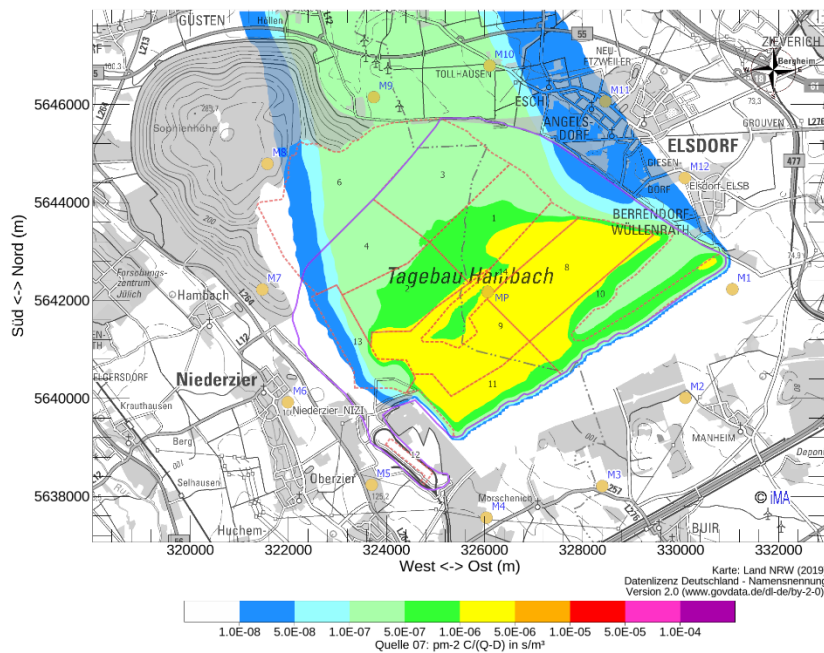


Abbildung 7: PM₁₀-Austragsfahne bei Ausbreitungsklasse AK3, Windrichtung 180°, Quelle 7 (Baggerseite Bänder).

4.2 Berechnung der mittleren Stundenfracht

Für die Berechnung der mittleren Stundenfracht (mittlerer PM₁₀-Ausrag je Stunde) muss zunächst der Windrichtungsbereich im Excel-Modell definiert werden, der die maximale PM₁₀-Konzentration erfasst. Dazu wurden die Konzentrationsdifferenzen gegen die Windrichtungen aufgetragen und die gleitenden Mittelwerte betrachtet. Die Bereiche, die ein Maximum zeigen, werden zur Berechnung der mittleren Stundenfracht mittels des Excel-Modells herangezogen. Der verwendete Windrichtungsbereich spannt sich dabei über den Bereich, in dem die Hälfte des Maximums überschritten wird. Zur Veranschaulichung siehe Abbildung 8 und Abbildung 9.

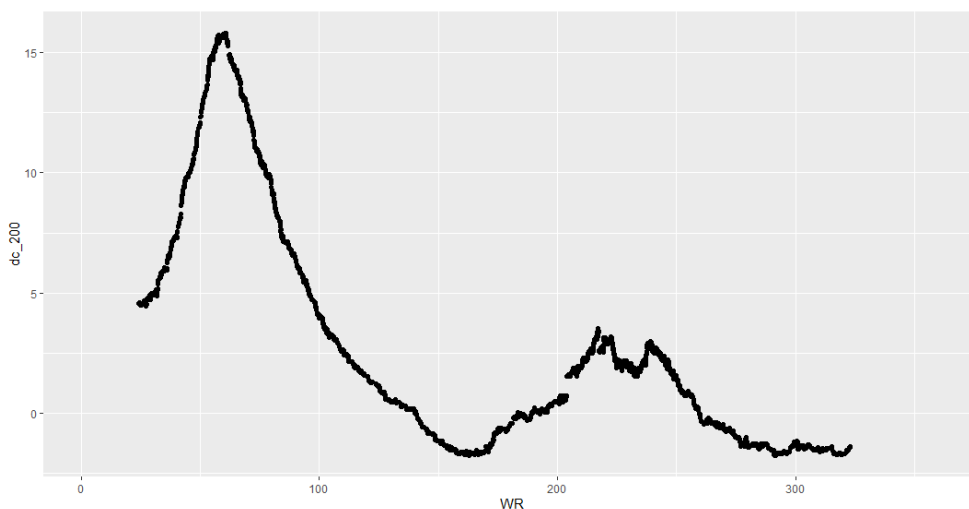


Abbildung 8: Gleitender Mittelwert der gemessenen PM₁₀-Konzentrationsdifferenz (µg/m³, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) bei Ausbreitungsklasse III/1 (AK3).

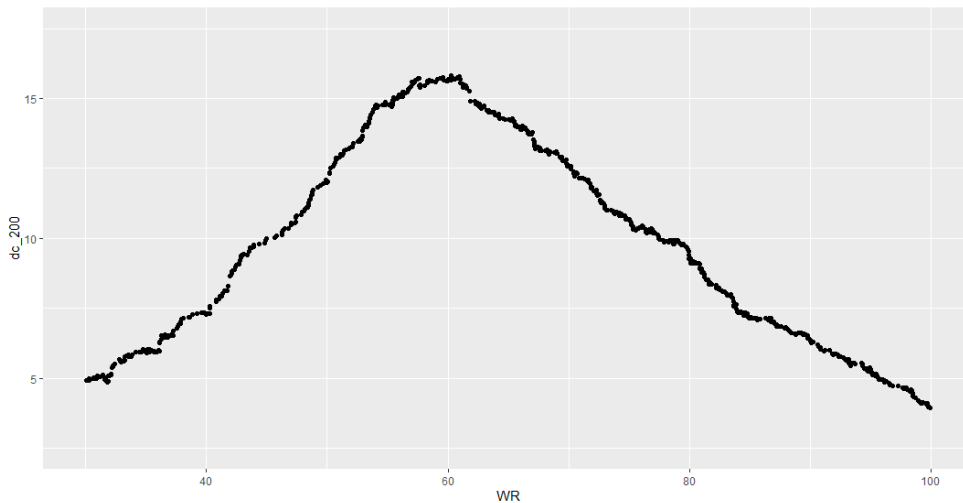


Abbildung 9: Gleitender Mittelwert der gemessenen PM₁₀-Konzentrationsdifferenz (µg/m³, y-Achse) mit Messpunkt 6 (Station Niederzier) in Lee, Ausbreitungsklasse AK3. Dies ist ein Ausschnitt aus Abbildung 8.

In Abbildung 9 wird ersichtlich, dass sich über eine Konzentrationsdifferenz von 5–15 µg/m³ ein Maximum ausbildet und dabei den Windrichtungsbereich von 30° bis 110° umspannt. Die Hälfte des Maximums wurde bei diesem Beispiel für einen Windrichtungsbereich von 45°–75° erreicht (Halbwertsbreite).

Für den Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf) wurde der Windrichtungsbereich von 204°–235° zur Berechnung herangezogen (siehe Abbildung 10). Ein Überblick über die ermittelten Windrichtungsbereiche gibt Tabelle 2. Die Abbildungen zu den übrigen Ausbreitungsklassen sind im Anhang A.5 dargestellt.

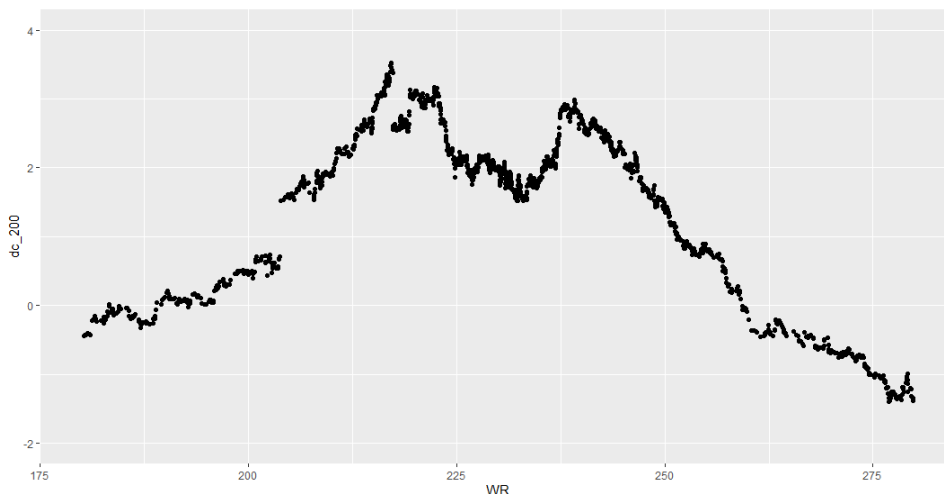


Abbildung 10: Gleitender Mittelwert der gemessenen PM₁₀-Konzentrationsdifferenz (µg/m³, y-Achse) mit Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf) in Lee, Ausbreitungsklasse AK3. Ausschnitt aus Abbildung 8.

Für die auf diese Weise definierten Windrichtungsbereiche wurde auf Basis des Excel-Modells der mittlere PM₁₀-Austrag pro Stunde (Stundenfracht) berechnet. An Messpunkt 6 (Station Niederzier) wurde das Excel-Modell unverändert übernommen, während für Messpunkt 12 (Station Elsdorf-Berrendorf) der PM₁₀-Austrag mit dem mittleren Korrekturfaktor 2,06 multipliziert wurde. Aus den Ergebnissen der beiden Messpunkte wurden anschließend je Ausbreitungsklasse ein gewichteter Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der mittleren Stundenfrachten je Ausbreitungsklasse. Dargestellt sind jeweils die Werte für die beiden Windrichtungsbereiche und für den daraus gebildeten gewichteten Mittelwert.

Ausbreitungsklasse	Windrichtungsbereich	Fracht (kg je Stunde)
AK1	67°–84°	5,89
	207°–212°	25,91
	Mittelwert	10,68
AK2	52°–72°	34,11
	214°–247°	35,41
	Mittelwert	34,71
AK3	45°–75°	108,88
	204°–235°	78,31
	Mittelwert	87,33
AK4	54°–80°	125,30
	200°–220°	112,16
	Mittelwert	118,73
AK5	48°–62°	75,50
	190°–215°	155,66
	Mittelwert	119,39
AK6	48°–75°	103,21
	206°–232°	156,35
	Mittelwert	111,71

4.3 Berechnung der Jahresfracht

Die Werte für die mittleren Stundenfrachten wurden je Ausbreitungsklasse mit der Anzahl der Stunden je Ausbreitungsklasse multipliziert und die Ergebnisse aller Ausbreitungsklassen addiert. Für 81 Stunden konnte im Jahr 2013 keine Ausbreitungsklasse angegeben werden. Für diese fehlenden Stunden wurde das Ergebnis mittels linearer Extrapolation ermittelt.

Tabelle 3: Verteilung der Ausbreitungsklassen im Jahr 2013

Ausbreitungsklasse	Anzahl in Stunden
AK1	935
AK2	1731
AK3	3837
AK4	1450
AK5	466
AK6	260
keine	81

Auf diesem Weg wurde eine Jahresfracht von 668,2 t PM₁₀ ermittelt.

4.4 Qualitätssicherung: Überprüfung der Niederschlagskorrektur

Bei dem bisher beschriebenen Rechenweg wurde der Niederschlag nur indirekt berücksichtigt, da in die Berechnung der mittleren Stundenfracht sowohl die niederschlagsfreien Stunden als auch die Stunden mit Niederschlag einfließen. Es wurde überprüft, ob eine genauere, direkte Aufschlüsselung

zu einem eindeutig geringeren Ergebnis für die Jahresfracht führt. Dazu wurde für alle Ausbreitungsklassen sowohl eine mittlere Stundenfracht für die niederschlagsfreien als auch für die Stunden mit Niederschlag ermittelt. Die Werte sind in Tabelle 4 angegeben.

Anschließend wurden für die Ausbreitungsklassen AK3, AK4 und AK5 jeweils die Stunden mit Niederschlag mit dem Mittelwert für Stunden mit Niederschlag multipliziert und analog die niederschlagsfreien Stunden mit dem Mittelwert für Stunden ohne Niederschlag. Für die Ausbreitungsklasse AK3 führte dieses Vorgehen zu einer Reduktion des Ergebnisses auf 99,9 %. Für Ausbreitungsklasse AK4 und AK5 führte es zu einem Anstieg auf 100,5 % bzw. 101,5 %. Bei der Jahresfracht konnte kein Einfluss der Niederschlagskorrektur festgestellt werden.

Die direkte Niederschlagskorrektur wurde verworfen, da sie das Bilanzierungsverfahren komplexer macht, ohne das Ergebnis signifikant zu beeinflussen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der mittleren Stundenfrachten, unterteilt bezüglich Niederschlags. Dargestellt sind jeweils die Werte für die beiden Windrichtungsbereiche und für den daraus gebildeten gewichteten Mittelwert.

Ausbreitungsklasse	Windrichtungsbereich	Fracht (kg/h) bei Niederschlag	Fracht (kg/h) ohne Niederschlag	Verhältnis mit zu ohne Niederschlag
AK1	67°–84°	4,63	5,99	0,77
	207°–212°	35,54	25,31	1,40
	Mittelwert	10,81	10,67	1,01
AK2	52°–72°	35,70	33,95	1,05
	214°–247°	27,81	35,69	0,78
	Mittelwert	33,65	34,79	0,97
AK3	45°–75°	138,43	106,08	1,30
	204°–235°	46,01	83,72	0,55
	Mittelwert	64,61	90,63	0,71
AK4	54°–80°	65,46	130,97	0,50
	200°–220°	89,95	115,62	0,78
	Mittelwert	80,37	123,50	0,65
AK5	48°–62°	68,81	76,13	0,90
	190°–215°	107,35	181,43	0,59
	Mittelwert	95,49	123,38	0,77
AK6	48°–75°	155,41	100,60	1,54
	206°–232°	0,00	170,56	0,00
	Mittelwert	116,56	111,44	1,05

5 Ermittlung des Emissionsfaktors

Mit dem berechneten PM₁₀-Austrag für den Tagebau Hambach im Jahr 2013 kann unter Einbeziehung der Rohstoffförderleistung von 43.195.000 Tonnen pro Jahr (Gödde 2021) ein Emissionsfaktor ermittelt werden. **Dieser liegt bei 15,5 g PM₁₀ / t Kohle.** Da Hambach mit seiner derzeitigen Abbaufäche der größte Tagebau in Deutschland ist, wird für einen allgemein gültigen Emissionsfaktor für die Tagebaue in Deutschland ein abgerundeter Emissionsfaktor von **15 g/t** vorgeschlagen.

6 Quellenverzeichnis

Chang, J. C. und Hannah, S. R. (2004): Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics* 87(1):167-196, DOI:10.1007/s00703-003-0070-7

DIN (2008a): DIN EN 15259:2008-01 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. Berlin: Beuth Verlag

DIN (2008b): DIN EN 15445:2008-04 Fugitive und diffuse Emissionen von allgemeinem Interesse für Industriebereiche - Qualitative Abschätzung fugitiver Emissionsquellstärken aus Immissionsmessungen mit der RDM (Reverse Dispersion Modelling)-Methode; Deutsche Fassung EN 15445:2008. Berlin: Beuth Verlag

DIN (2018): DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017 Berlin: Beuth Verlag

Gödde, K (2019): Geländedaten. Raster 5 mal 5 m. Persönliche Mitteilung (Download-Link) vom 12. März 2019

Gödde, K. (2020): Tool der BUW mit der letzten Bilanzierungsvariante Hambach für das Jahr 2013. Persönliche Mitteilung (Download-Link) vom 30. Januar 2020

Gödde, K. (2021): Kohleförderung Hambach in 2013. E-Mail vom 5. Oktober 2021

Gödde, K. und Thelen, E. (2019a): Oberkante_HA_012013. E-Mail mit Anlage vom 29. Mai 2019

Gödde, K. und Thelen, E. (2019b): Teilbereiche_TH2013 mit Koordinaten. E-Mail mit Anlage vom 30. Juli 2019

Hasel, M. und Nielinger, J. (2019): Fehlende Berichterstattung von Feinstaubemissionen (PM₁₀) aus Braunkohle-Tagebauen in PRTR. Modellrechnungen zur Austragscharakteristik von PM₁₀ aus einem Braunkohletagebau. UBA-Projekt-Nr. 121 793. iMA Bericht Nr. 19-04-08-S vom 17. Oktober 2019, 29 Seiten.

Perry, S. G., Thompson, R. S., Petersen, W. B. (1994): Considerations for Modeling Small-Particulate Impacts from Surface Coal Mining Operations Based on Wind-Tunnel Simulations. Proceedings Eighth Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology, January 23–28, Nashville, TN

TA Luft (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021 (GMBI, 2021, Nr. 48–54, S. 1050–1192)

U. S. EPA (1995): User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models Volume II – Description of Model Algorithms. U. S. Environmental Protection Agency; Office of Air Quality Planning and Standards; Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Research Triangle Park, NC

U. S. EPA (1998): Revision of Emission Factors for AP-42 Section 11.9 Western Surface Coal Mining. Revised Final Report. For U. S. Environmental Protection Agency; Office of Air Quality Planning and Standards; Emission Factor and Inventory Group. Research Triangle Park, NC

Vaupel, K. (2018): Entwicklung eines Verfahrens zur Bilanzierung diffuser Staubquellen im Kontext des europäischen Schadstofffreisetzung- und Verbringungsregisters. Aachen: Shaker Verlag

VDI (2000): VDI 3945 Blatt 3:2000-09 Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2005): VDI 4285 Blatt 1:2005-06 Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen; Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2006): VDI 3782 Blatt 5:2006-04 Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Depositionsparameter. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2015a): VDI 3783 Blatt 16:2015-06 Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2015b): VDI 3790 Blatt 1:2015-07 Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Grundlage. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2015c): VDI 4285 Blatt 3:2015-11 Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen – Quantifizierung von diffusen Feinstaubemissionen aus industriellen Anlagen einschließlich landwirtschaftlicher Quellen. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2017a): VDI 3782 Blatt 6: 2017-04 Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2017b): VDI 3783 Blatt 7:2017-05 Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. Berlin: Beuth Verlag

VDI (2017c): VDI 3783 Blatt 8:2017-04 Umweltmeteorologie – Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. Berlin: Beuth Verlag

Verordnung (2006): EG Nr. 166/2006 des europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und Verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinie 91/689/EWG und 96/61/EG des Rates

VGB (2011): Ermittlung von Emissionsfaktoren für die Lagerung und den Umschlag von Kohle: Braunkohle. Projekt-Nr.: 09-04_07-FR im Auftrag von VGB PowerTech e. V. Essen

Anhang

A.1 Überprüfung des Excel-Werkzeugs zur Bestimmung der Ausbreitungsklasse Korrekturen

- Als Messzeiten sind nach Abschnitt 4.1 der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 die Zonenzeiten MEZ für das Ende des Beobachtungsintervalls (der Stunde) zu verwenden. Die DWD-Daten haben Zeitstempel für das Ende des Beobachtungsintervalls (der Stunde) in UTC. Die DWD-Zeitstempel dürfen daher für den Vergleich mit Sonnenaufgang (SA) und Sonnenuntergang (SU) nicht wie bisher im Werkzeug direkt verwendet werden, sondern müssen um 1 Stunde erhöht werden: für den Vergleich ist statt der Spalte „aktuelle Stunde“ die Spalte „Tagesstunde“ zu verwenden.
- Die Zeiten Sonnenaufgang (SA) und Sonnenuntergang (SU) müssen beim Vergleich mit Messzeiten (siehe oben) exakt verwendet werden (siehe Anmerkung zu Abschnitt 4.1 der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6) und nicht wie bisher im Werkzeug auf 30 Minuten nach der vollen Stunde (Mitte des Beobachtungsintervalls) gerundet.
- Die Korrektur nach Abschnitt 4.4 Buchstabe a) der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 fehlte im Werkzeug und wurde ergänzt.
- Falls die Zirren-Bedingung vorliegt, wird die um 3/8 reduzierte Gesamtbedeckung und nicht wie bisher im Werkzeug die beobachtete Gesamtbedeckung als Eingangsgröße für die Korrektur nach Abschnitt 4.4 Buchstabe b) der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 verwendet.
- Der Fehler mit den stärksten Konsequenzen betraf Fußnote a) zu Tabelle 3 der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6. Durch einen Fehler bei der Abfrage wurde Ausbreitungsklasse II allen Situationen der Tabelle und nicht nur den drei durch die Fußnote in der Richtlinie ausgezeichneten Fällen zugewiesen. Dadurch wurde die Ausbreitungsklasse II viel zu häufig zugewiesen.

Erweiterung

- Es wurde ein Tabellenblatt eingefügt, das den Import von Datensätzen „Cloud Type“ des DWD (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/cloud_type/) alternativ zu Datensätzen „Cloudiness“ (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/cloudiness/) erlaubt. „Cloud Type“ ist die Voraussetzung für eine Prüfung der Zirren-Bedingung nach Abschnitt 4.3 der Richtlinie VDI 3782 Blatt 6.

A.2 Überprüfung des Excel-Modells

Tabelle A1: Übersicht über die Tabellenblätter und die darin vorgenommenen Korrekturen

Tabellenblatt	Inhalt
1--Grundeinstellungen	Jahr, Länge und Breite, Stationen A und B, Rauigkeitslänge, usw.
2--Dateneingabe	Zeitreihen der Konzentrationen, Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten an beiden Stationen und der Ausbreitungsklasse.
3--PRTR-Protokoll	Wichtigste Eingaben und Ergebnisse, einschl. Häufigkeiten von Ausbreitungsklassen, Emissionsfaktoren pro Fläche Tagebau und pro kg geförderter Kohle.

Tabellenblatt	Inhalt
#Bilanzanalysetool	Ergebnis-Diagramme (Windrose aus (intern)-7, Windgeschwindigkeitsklassen aus (intern)-7, Zusatzbelastungen, Bilanzierungslänge).
#Daten_für_Übertragsrechnungen	Ergebnis-Zeitreihen: AK, WG, Windrichtungsklasse, Konzentrationsdifferenz, Austragshöhe, Bilanzierungslänge, ausgetragene Masse.
#Voreinstellungen	Hinterlegte Konstanten: von Karman usw., Coriolisparameter, auch Parameter für ISC3-Formel.
(intern)-Auswahlvorlagen	Auswahlvorlagen für Tabellenblatt 1; Zeitachse für Zeitreihe.
(intern)-hinterlegte Daten	<p>26 Spalten</p> <ul style="list-style-type: none"> • VDI 3783 Blatt 8, Tabelle 3: Klassierte Werte der Obukhov-Länge für die Ausbreitungsklassen und Rauigkeitslängen, Ausbreitungsklassen von V nach I (absteigend). Noch auf dem Stand des Gründrucks von 2015. Verschieden nur bei AK III/1. Aktualisiert auf Stand Weißdruck von 2017. • Dezimale Darstellung von Länge und Breite, Coriolisparameter. • Windrichtungsklassen für Bilanzierungslängen.
(intern)-0-Eingangsdatenaufber.	<p>29 Spalten</p> <p>Prüft Eingangsdaten auf Vollständigkeit. Falls vollständig, „Aktivator“ auf 1 gesetzt. Jede Stunde der Zeitreihe wird nur „aktiv“, wenn Eingangsdaten vollständig.</p>
(intern)-1-Situationsanalyse-A	<p>Situationsanalyse LUV-LEE und Klassierung der Windrichtung in Lee (vgl. Vaupel 2018 Abschnitt 7.2.1)</p> <p>86 Spalten</p> <p>Prinzip: rechnen mit Wind in Lee. Luvstation: Spalte AL. Leestation: Spalte AM.</p> <p>Fehler: Vermeintlich <u>vektorielle</u> Mittelung der Windrichtung. Geht zwar den Umweg über <u>kartesische</u> Koordinaten, ignoriert aber die Windgeschwindigkeit und ist daher im Ergebnis nur eine <u>skalare</u> Mittelung der Windrichtung. Irreführend insbesondere, wenn Messung einer Station entfällt (als Windrichtung 0 Grad gewertet) (verfälscht Windrichtungsstatistik). Korrigiert.</p> <p>Fehler in Spalte AT, Windrichtung in Lee, wurde ohne Aktivator übertragen. Korrigiert. Fehler in Spalte AU zur Einteilung der Ereignisse in Windklassen, bei Klasse 1 wurden auch 0-Werte erfasst. Vermutlich nur wichtig für Blatt 7-Analyseaufbereitung und Diagramme. Trotzdem korrigiert. Fehler in Spalte BM zur Klassierung der Konzentrationen, bei Klasse 1 wurden auch neg. Werte (Einträge) erfasst. Vermutlich nur wichtig für Blatt 7-Analyseaufbereitung und</p>

Tabellenblatt	Inhalt
	Diagramme. Trotzdem korrigiert und um Spalte zu neg. Werte ergänzt.
(intern)-2-Situationsanalyse B	Tag-Nacht-Zuordnung sowie Bestimmung der Bilanzierungslänge für STUFE 4 Bilanzierung: L_B und B_B 36 Spalten
(intern)-3-Vertikalprofil	Vertikalkonzentrationsprofil – 134 Spalten <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung z_{ISC3} gemäß Gl. (7.13) und Gl. (7.17) in Spalte Q, aber fehlerhaft ohne Division durch 4,3. Korrigiert. • Spalten R bis W: überstrichene Länge je nach Einstellung nach ISC3 oder – hier - ganzer Tagebau. • Berechnung z_{exit_ISC3} Gl. (7.18) in Spalte X. • Unterteilung in 10 Schichten (Höhenklassen) gemäß Vaupel 2018 Gl. (7.19) und Abb. 22 => Schichthöhe, genannt „Klassenhöhe“, in Spalte Z; Berechnung der Höhen der 10 Schichtmitten („Schwerpunkthöhen“) in Spalten AA bis AJ. • In weiteren Spalten folgen alternative Konzentrationsprofile; hier höhenkonstant (Spalten AN bis AW). • Spalten DR bis ED: Statistik der Austragshöhen.
(intern)-4-Windfeldmodell	Windfeldmodellierung nach Entwurf VDI 3783 Blatt 8:2015 346 Spalten <ul style="list-style-type: none"> • Spalte E bezieht gemittelte Windrichtung aus (intern)-1-Situationsanalyse-A, Spalte AK, fehlerhafter Bezug, Neuberechnung der gemittelten Windrichtung in Spalte AL. Korrigiert. • Spalten I bis Q berechnen u^* auf Grundlage des analytischen Windprofils nach Anhang A2: Beinahe richtig. Übersehen wurde dabei die Berücksichtigung der Verdrängungshöhe nach Gründruck Gl. (45) bzw. (46) oder Weißdruck Gl. (54) bzw. (55). Ist aber bei kleinen Rauigkeitslängen vernachlässigbar und wird nicht korrigiert. • Spalten R bis Z: Mischungsschichthöhe: Fehlerhafte Berechnung Gründruck Gl. (62) [Weißdruck Gl. (66)] Fall 2 in Spalte U wegen Bezug auf Spalte R statt Spalte S (fehlt Multiplikation mit $\alpha=0,3$). Korrigiert. • Spalte X (Monatsindex für labile Mischungsschichthöhe war konstant auf 8 gesetzt). Korrigiert: Monatsindex aus Datum berechnet. • Spalte Z wählt Mischungsschichthöhe endgültig aus. Allerdings Fehler: Unterscheidung nicht wie nach Richtlinie nach Ausbreitungsklassen, sondern nach Vorzeichen der Obukhov-Länge L: negatives L bei AK III/2 fälschlich wie AK IV und V behandelt. Korrigiert.

- Spalte AA berechnet h_1 nach VDI 3783-13 Gl. (A19). Exponent für Fall 1 in Gründruck und Tool fälschlich 0,25; in Weißdruck korrekt 0,5. Korrigiert.
- Spalten AO bis ET berechnen die Windgeschwindigkeit in den 10 Höhenklassen (Schichten) des Modells jeweils für den Klassenschwerpunkt (Schichtmitte) nach dem analytischen Profil des Anhang A der Richtlinie für den Fall, dass die Schichten unterhalb der Höhe h_1 liegen (ausgewählt wird die Windgeschwindigkeit im Nachgang abhängig von Schicht unter oder über h_1).
- Fehlerhaft dabei jedes Mal die Berechnung von Ψ_1 nach Gl. (A5): Im Nenner des zweiten Bruchs im Argument des Logarithmus wird auf die Spalte mit z/L statt auf die Spalte mit X_0 verwiesen; jeweils korrigiert.
- Spalten EU bis EY: Berechnung von $K = K_m(h_1)$ gemäß Gl. (A20) und Gründruck Gl. (33) bzw. Weißdruck Gl. (36).
- Insbesondere EW für den labilen Fall $L < 0$. Fehlerhaft berechnet, da der Faktor $ku \cdot h_1$ (vorberechnet in Spalte EU) vergessen wurde. Korrigiert.
- Spalten EZ bis HH berechnen die Windgeschwindigkeit in Schicht 2 nach Anhang A Teil b) der Richtlinie.
- Spalte FN berechnet Ψ_1 nach Weißdruck Gl. (A5) fehlerhaft: Spaltenbezug für X_0 im zweiten Bruch FG (d. h. z/L) statt FL (d.h. X_0). Korrigiert.
- Spalten HI-HR übertragen $u(z)$ aus den Spalten aus Schicht 1 (AY; BJ etc.).
- Spalten HS-IB zeigen Windgeschwindigkeit aus vorherigen Berechnungen in Abhängigkeit von Verhältnis von Schwerpunkthöhe und Schichthöhe.
- Spalte ID holt $z_{\text{exit_initial}}$ aus Vertikalprofil.
- Spalte IE und IF berechnen Faktoren für folgende Berechnung.
- Spalten IG, IH und II berechnen K_w im stabilen und labilen Fall (Gründruck Gl. (43)). Fehlerhaft, da statt $\alpha=0,3$ (§13 in den #Voreinstellungen) der Coriolisparameter $fc=0,00011$ (§11 in den #Voreinstellungen) verwendet wird. Korrigiert.
- Spalte II berechnet K_w im labilen Fall (Gründruck Gl. (43)) fehlerhaft, da Faktor $ku \cdot z$ (Spalte IG) vergessen wurde. Korrigiert.
- Spalte II, K_w : Weitere Korrektur bei labiler Schichtung von Gründruck Gl. (43) auf Weißdruck Gl. (46): Vorfaktor des zweiten Summanden 9 statt 15. Korrigiert.
- Spalte IN berechnet σ_w nach Gl. (39) Gründruck bzw. Gl. (42) Weißdruck: Fehlerhaft, da

Bezug auf w^* falsch ist (Spalte M statt IM).
Korrigiert.

- Spalte IN weiter fehlerhaft, weil statt $\alpha = 0,3$ ($\$E\13 in den #Voreinstellungen) der Coriolisparameter $f_c = 0,00011$ ($\$E\11 in den #Voreinstellungen) verwendet wird. Korrigiert.
- Spalte IN weiter fehlerhaft, weil die Potenz 3 im ersten Summanden nicht auf den ganzen Summanden, sondern nur auf die E-Funktion (Faktor im ersten Summanden) angewendet wurde. Korrigiert.
- Spalte IN weiter fehlerhaft, weil z/h_m im zweiten Summanden als Verweis auf Spalte F (d. h. z_0) statt auf Spalte IF bezogen wird. Korrigiert.
- Spalte IN weiter fehlerhaft, weil nicht der ganze zweite Summand, sondern nur der letzte Faktor (die letzte Klammer) im zweiten Summanden zur Potenz 3 erhoben wurde. Korrigiert.
- Spalten IO-IY berechnen Windgeschwindigkeit in Schicht 1 für $u(z_{\text{exit_initial}})$ nach Anhang A a).
- Spalte IV berechnet Ψ_1 nach Gründruck Gl. (A5) fehlerhaft: Spaltenbezug für X_0 im zweiten Bruch IO (d. h. z/L) statt IT (d. h. X_0). Korrigiert.
- Spalten IZ-JC berechnen Windgeschwindigkeit in Schicht 2 für $u(z_{\text{exit_initial}})$ nach Anhang A b).
- Spalte JD legt Windgeschwindigkeit fest in Abhängigkeit von $z_{\text{exit_initial}}$ und Schichthöhe.
- Spalte JE berechnet Reisezeit Austrittskante TGB-Öffnung bis Leekante Gelände über Gleichung 62 der Richtlinie.
- Spalte JF berechnet Lagrange-Korrelationszeit nach Gleichung 47.
- Spalte JG berechnet Σ_z für Übergabe an Vertikalprofil, Spalte X, nach Gleichung 61, Weißdruck, Faktor Σ_w wurde vergessen. Korrigiert.
- Spalten JK-LM berechnen Vergleichswindgeschwindigkeit in 10 m Höhe für Übertragbarkeitsanalyse.
- Spalten JK-JU Berechnung der Windgeschwindigkeit in Schicht 1 für $u(z=10 \text{ m}) / \text{m/s}$ analog zu Sp. IO-IX.
- Spalte JR berechnet Ψ_1 nach Weißdruck Gl. (A5) fehlerhaft: Spaltenbezug für X_0 im zweiten Bruch JK (d.h. z/L) statt JP (d.h. X_0). Korrigiert.
- Spalten JV-JZ, Berechnung von K identisch zu EU-EY nach Gleichung 36, Weißdruck.
- Spalten KA-KG, Vorbereitung Ekman-Lösung analog zu EZ-FF nach Gleichungen A10, 11, 14, 15, 18 und 21.

Tabellenblatt	Inhalt
	<ul style="list-style-type: none"> • Spalten KH-KR: Berechnung U(h1), identisch zu FG-GQ, inklusive Fehler bei Psi1 (siehe JR). Korrigiert. • Spalte LA bestimmt Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in Abhängigkeit von Schichthöhe, wird an Daten_für_Übertragsrechnungen Spalte D weitergegeben. Fehlerhafte WENN-Formel, korrigiert. • LO-LX Klassierung der Windgeschwindigkeiten für Übertragbarkeitsanalyse. • LZ-MG Klassierung der Schichtungsstabilität für Übertragbarkeitsanalyse. • Fehler in Spalte ME: falsche Bedingungen durch fehlendes =. Vermutlich nur wichtig für Blatt 7-Analyseaufbereitung und Diagramme. Trotzdem korrigiert. Auch in 3--PRTR-Protokoll, K31 bis M37.
(intern)-5-Datenfusion	<p>Datenfusion zur Bilanzierung – 144 Spalten</p> <p>Für jede von 10 Schichten (bis Auftragshöhe) Produkt aus Bilanzierungslänge, Schichthöhe, Windgeschwindigkeit in Schichtmitte, Dauer einer Stunde, Konzentrationsdifferenz. Negative Konzentrationsdifferenzen: Eintrag. Positive: Austrag.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spalten EE-EM Klassierung der Bilanzierungslänge für Bilanzierungsanalyse, für Spalten EF-EM Fehler in Bezügen. =. Vermutlich nur wichtig für Blatt 7-Analyseaufbereitung und Diagramme. Trotzdem korrigiert.
(intern)-6-Extrapolation usw	<p>Datenaufbereitung für PRTR-Protokoll</p> <p>33 Spalten</p> <p>Spalte V erfasst Stunden mit Aktivator = 1, wird verwendet, um in AD bilanzierten Zeitraum zu verwenden. Es waren allerdings auch parallele Windrichtungen erfasst. Korrigiert.</p> <p>Extrapolation: Zelle AD21: über Anzahl Jahresstunden/Bilanzstunden.</p>
(intern)-7-Analyseaufbereitung	<p>Datenzusammenstellung für die Bilanzierungsanalyse</p> <p>45 Spalten</p> <p>Anzahl Zeitpunkte, Häufigkeiten Windrichtungsklassen und Windgeschwindigkeitsklassen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spalte L gemittelte klassierten Windgeschwindigkeit benutzt zur Mittelwertbildung die Gesamtzahl und nicht die Zahl der Ereignisse pro Klasse. Vermutlich nur wichtig für Diagramme, nicht korrigiert.

A.3 Doppelsummenanalyse

A.3.1 Ausbreitungsklasse AK1

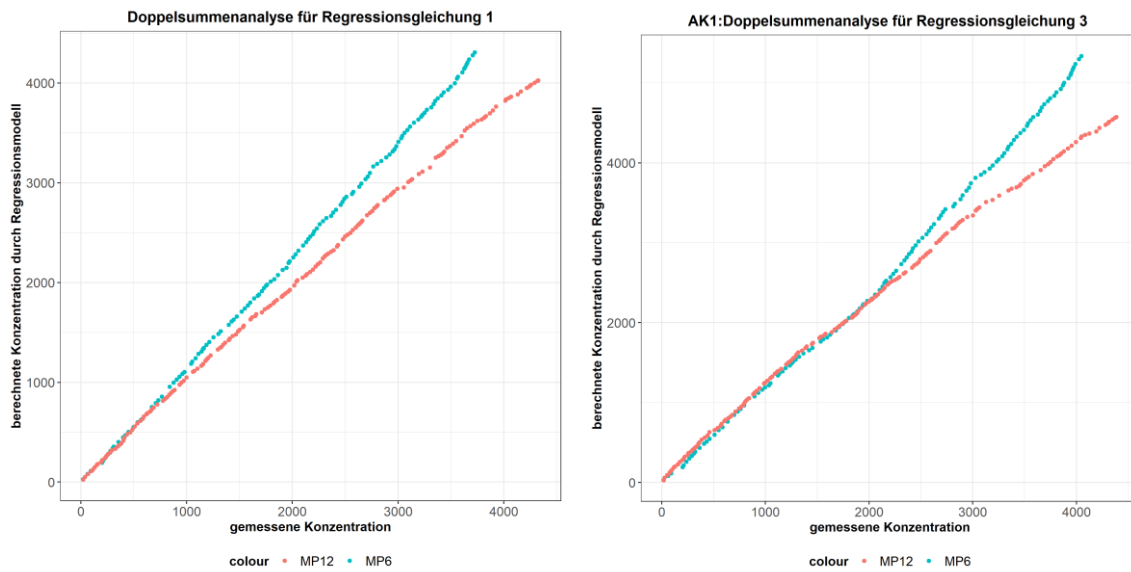


Abbildung A1: Doppelsummenanalyse für berechnete PM_{10} -Konzentrationen an beiden Messpunkten, links Berechnung mittels Regressionsgerade (R1), rechts für Regressionsgerade (R3). Zur Beschreibung siehe Abschnitt 3.3 und Abbildung 10.

A.3.2 Ausbreitungsklasse AK2

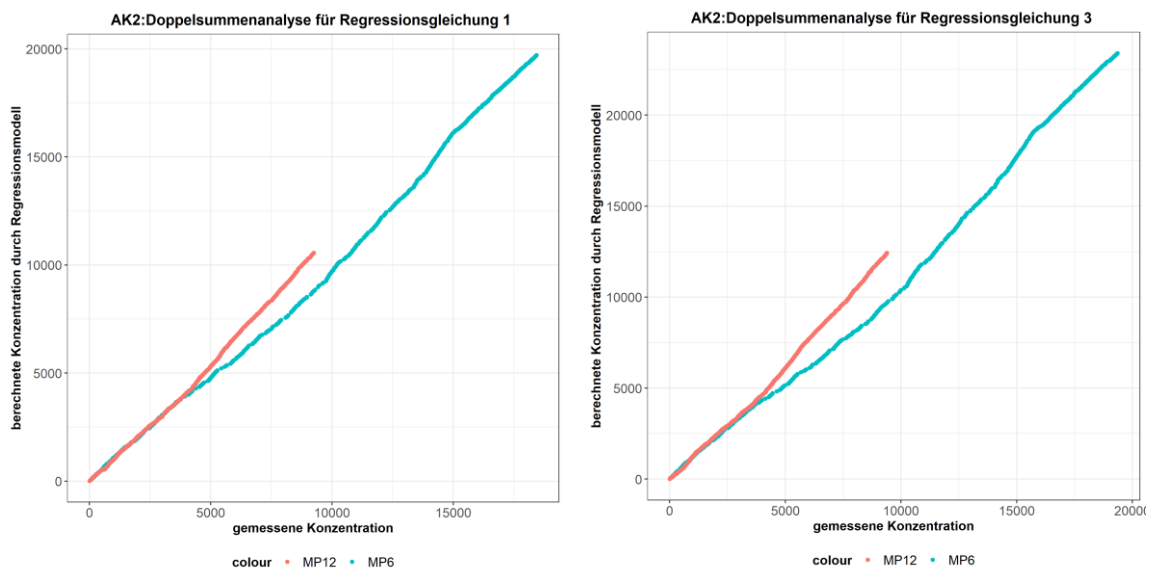


Abbildung A2: Doppelsummenanalyse für berechnete PM_{10} -Konzentrationen an beiden Messpunkten, links Berechnung mittels Regressionsgerade (R1), rechts für Regressionsgerade (R3). Zur Beschreibung siehe Abschnitt 3.3 und Abbildung 10.

A.3.3 Ausbreitungsklasse AK6

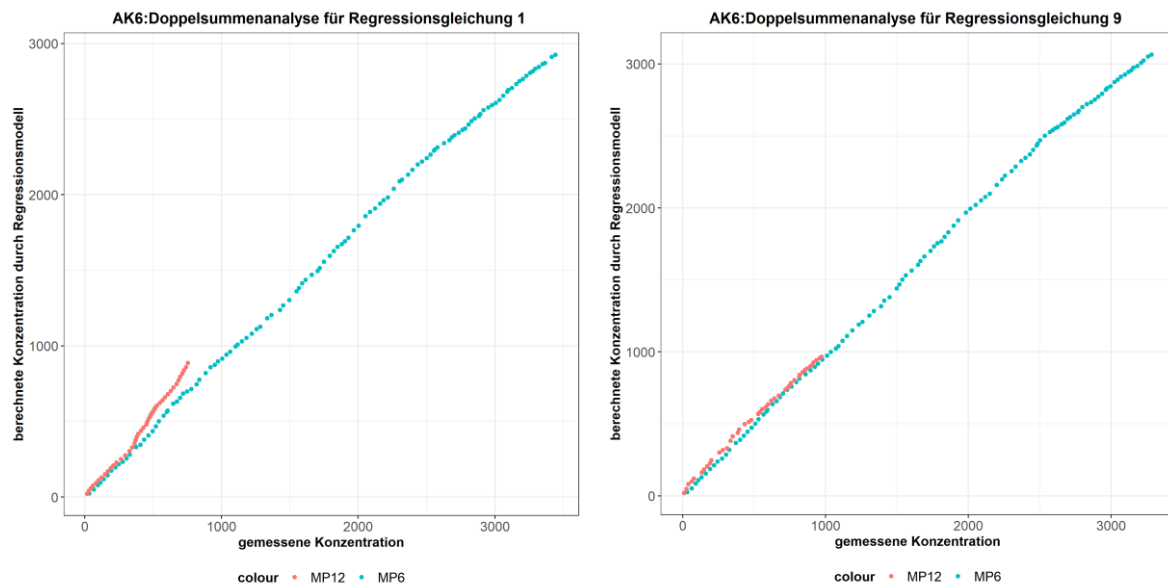


Abbildung A3: Doppelsummenanalyse für berechnete PM_{10} -Konzentrationen an beiden Messpunkten, links Berechnung mittels Regressionsgerade (R1), rechts für Regressionsgerade (R9). Zur Beschreibung siehe Abschnitt 3.3 und Abbildung 10.

A.4 Bestimmung der Kernwinkelbereiche zur Ermittlung der Korrekturfaktoren

A.4.1 Ausbreitungsklasse AK1

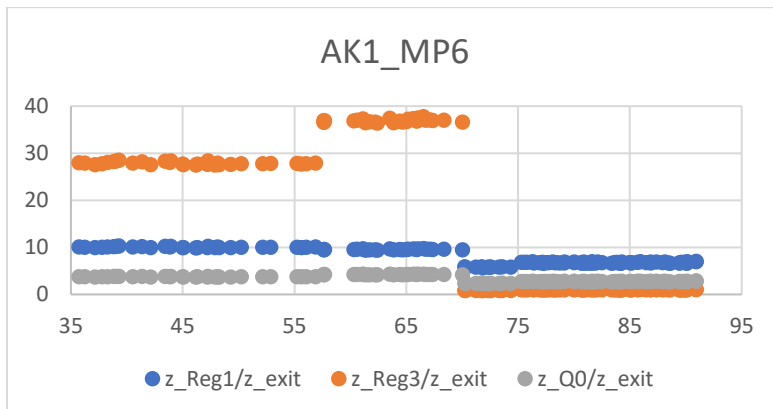


Abbildung A4: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 6. Neben der Regressionsgleichung (R3) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1) und (R2) (zu Quelle 0) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 70°–90°.

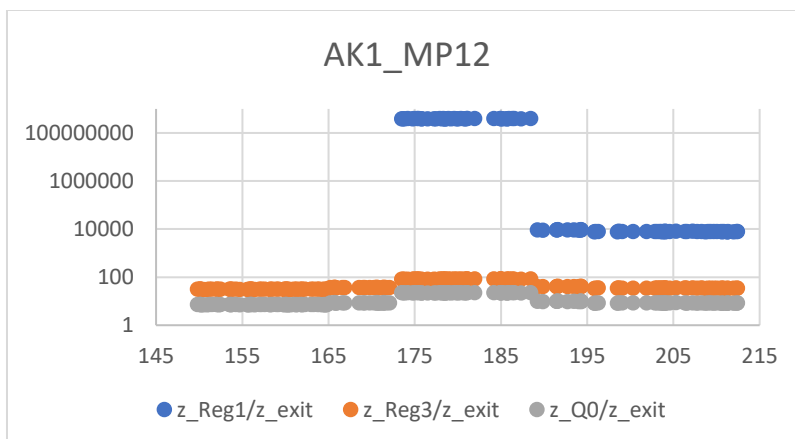


Abbildung A5: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 12. Neben der Regressionsgleichung (R3) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1) und (R2) (zu Quelle 0) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 189°–212°.

A.4.2 Ausbreitungsklasse AK2

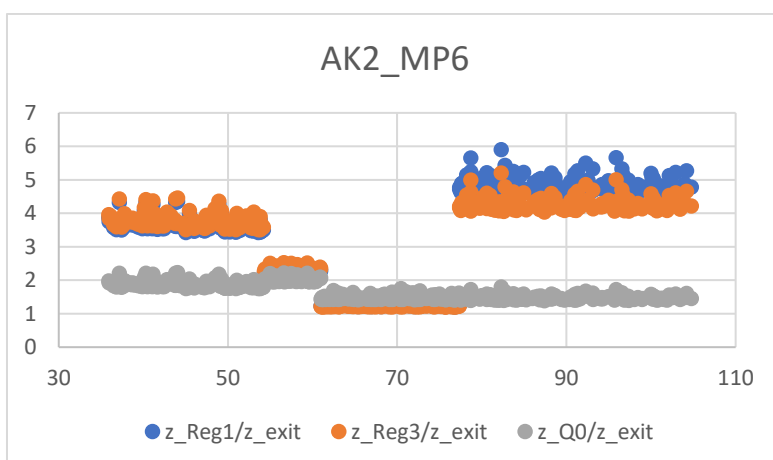


Abbildung A6: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 6. Neben der Regressionsgleichung (R3) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1) und (R2) (zu Quelle 0) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 61°–77°.

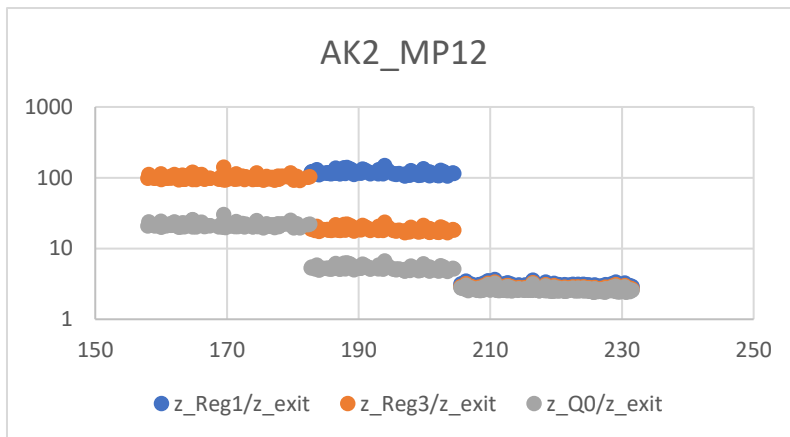


Abbildung A7: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 12. Neben der Regressionsgleichung (R3) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1) und (R2) (zu Quelle 0) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 205°–231°.

A.4.3 Ausbreitungsklasse AK6

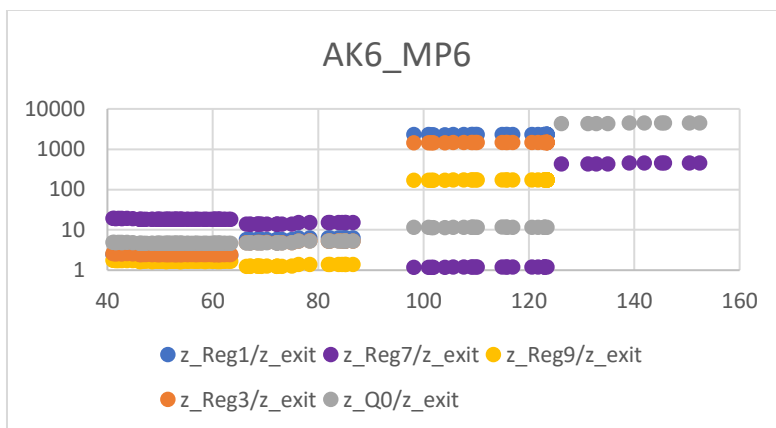


Abbildung A8: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 6. Neben der Regressionsgleichung (R9) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1), (R2) (zu Quelle 0), (R3) und (R7) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 67°–86°.

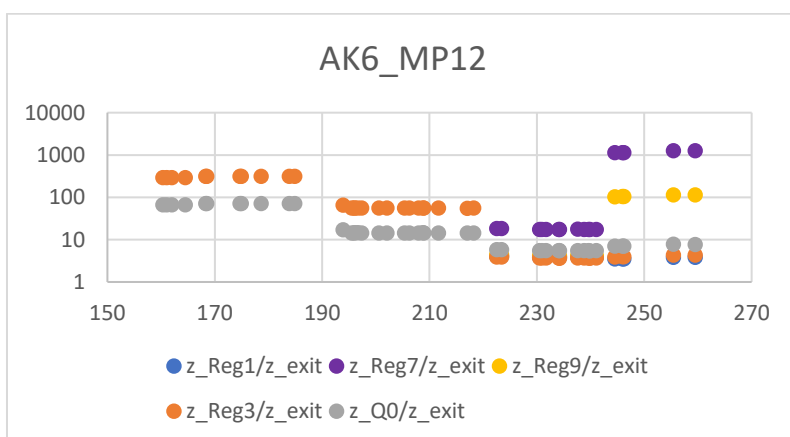


Abbildung A9: Darstellung der Korrekturfaktoren (y-Achse) je Windrichtung (Grad, x-Achse) am Messpunkt 12. Neben der Regressionsgleichung (R9) werden die Ergebnisse für die verworfenen Modelle (R1), (R2) (zu Quelle 0), (R3) und (R7) angegeben. Kernwindrichtungsbereich: 222°–241°.

A.5 Bestimmung des Windrichtungsbereiches zur Berechnung der mittleren Stundenfracht

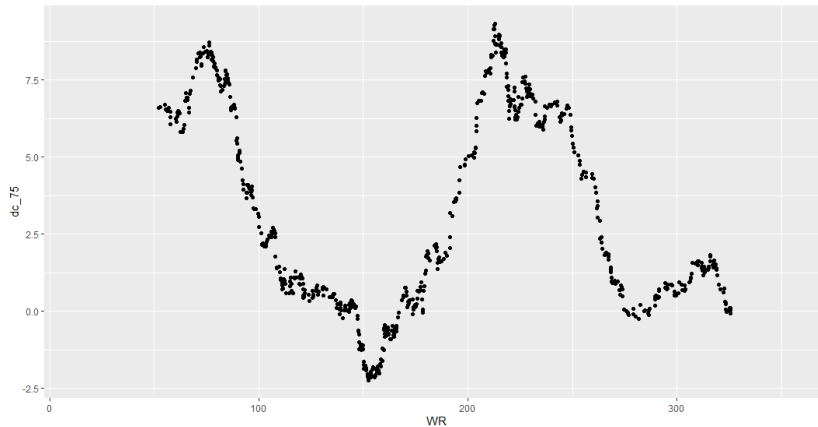


Abbildung A10: Gleitender Mittelwert der PM₁₀-Konzentrationsdifferenz ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) in Ausbreitungsklasse I (AK1).

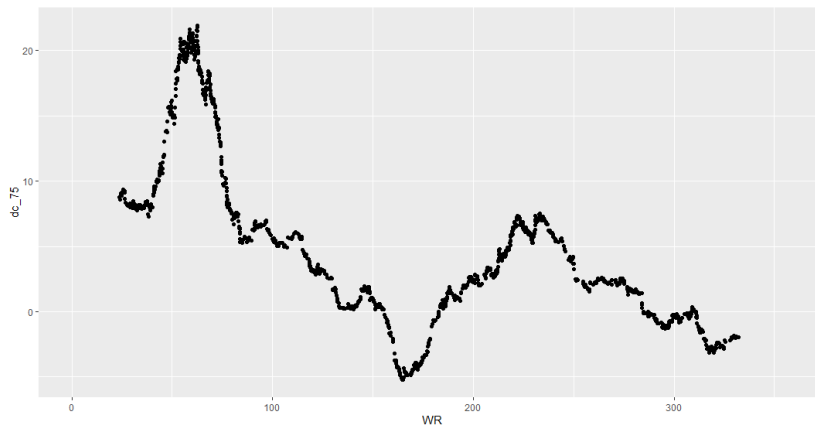


Abbildung A11: Gleitender Mittelwert der PM₁₀-Konzentrationsdifferenz ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) in Ausbreitungsklasse II (AK2).

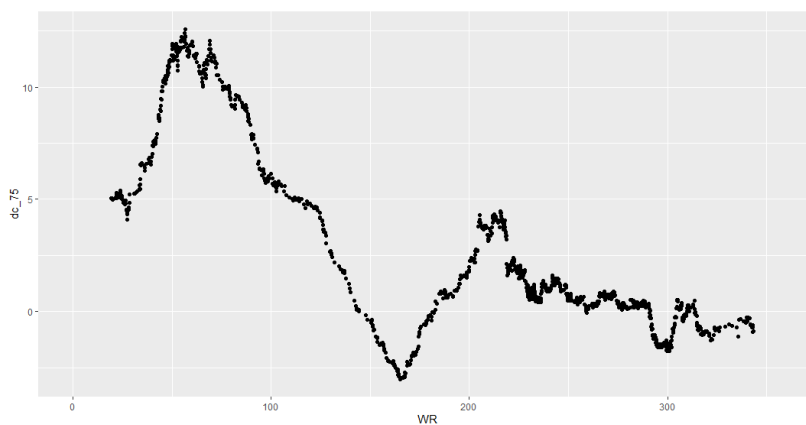


Abbildung A12: Gleitender Mittelwert der PM₁₀-Konzentrationsdifferenz ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) in Ausbreitungsklasse III/2 (AK4).

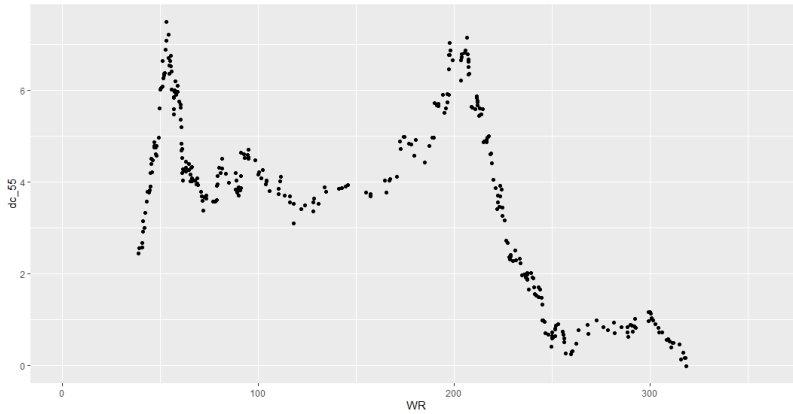


Abbildung A13: Gleitender Mittelwert der PM₁₀-Konzentrationsdifferenz (µg/m³, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) in Ausbreitungsklasse IV (AK5).

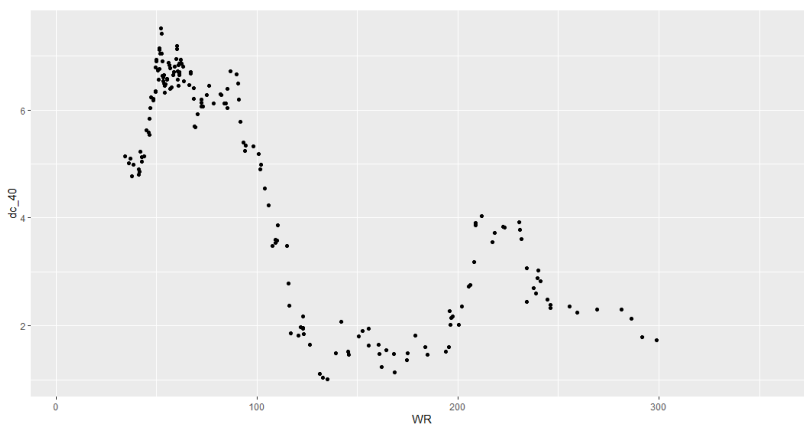
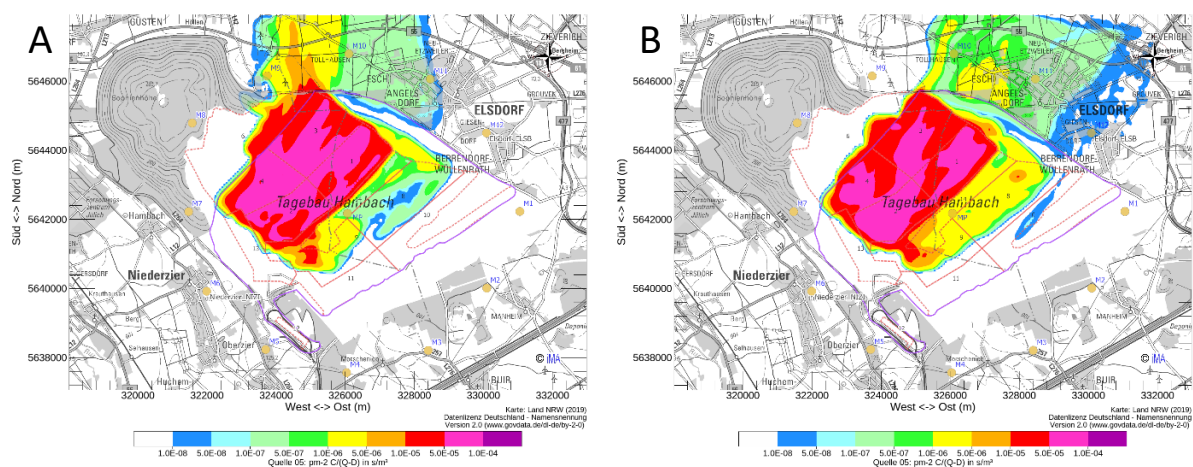


Abbildung A14: Gleitender Mittelwert der PM₁₀-Konzentrationsdifferenz (µg/m³, y-Achse) über alle Windrichtungen (Grad, x-Achse) in Ausbreitungsklasse V (AK6).

A.6 Besondere Situation in Ausbreitungsklasse AK1 am Messpunkt 12 (Elsdorf-Berrendorf)



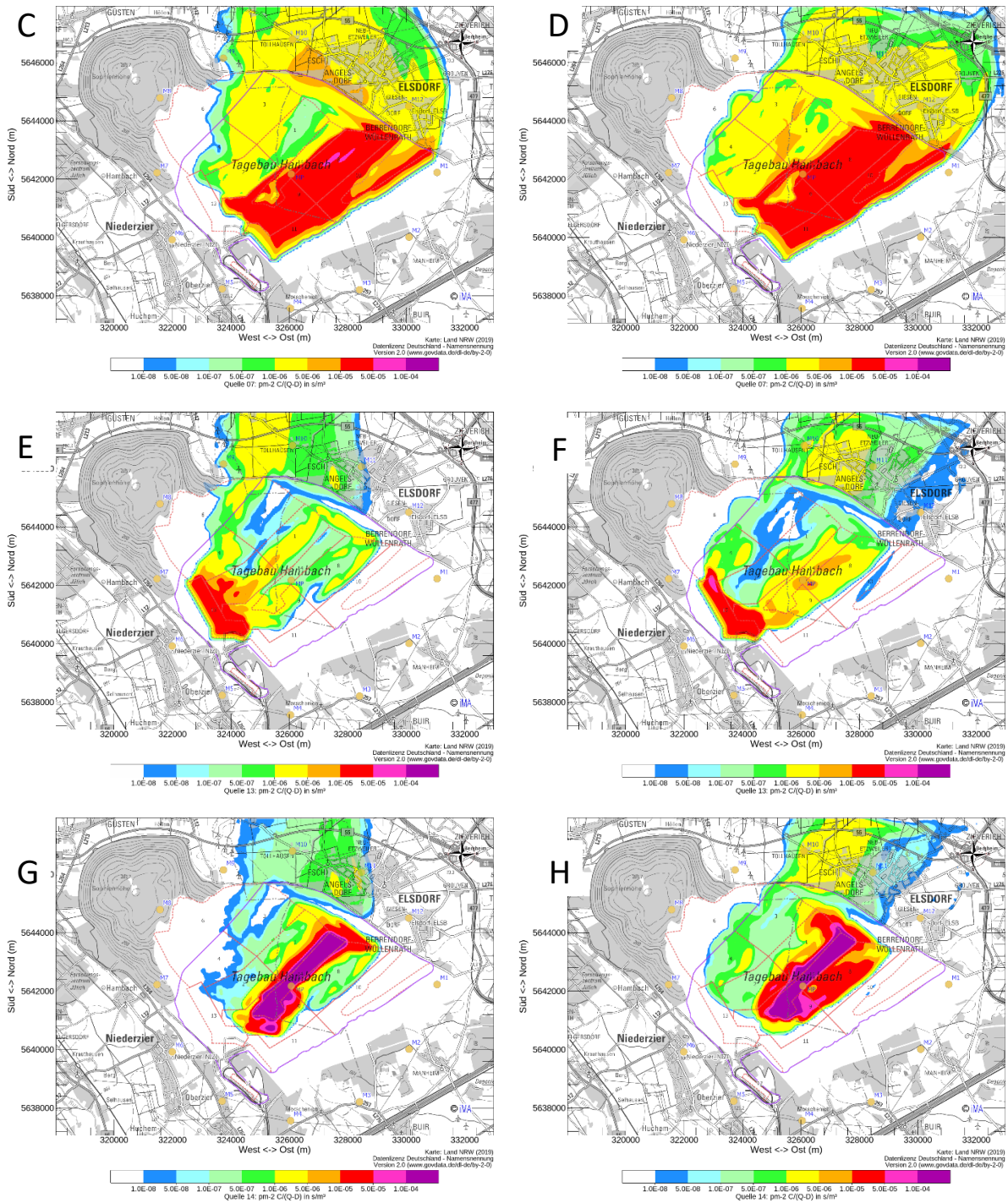


Abbildung A15: Ausbreitungsfahnen bei Anströmung aus 240° (A, C, E, G) und 270° (B, D, F, H) am Messpunkt 12 in der Ausbreitungsklasse AK1 für die Tagebauflächen/Quellen 5 (A, B), 7 (C, D), 13 (E, F) und 14 (G, H).