



LAND
TIROL

Winderosion einer Schottergrube

Auswertung langjähriger PM10 Messreihen und Berechnung der Emissionsmassenströme mittels Modellierung

Impressum

Amt der Tiroler Landesregierung

Abteilung Emissionen-Sicherheitstechnik-Anlagen und Abteilung Waldschutz

Herrengasse 1 – 3, Bürgerstraße 36

6020 Innsbruck

Email: esa@tirol.gv.at, waldschutz@tirol.gv.at

<https://www.tirol.gv.at/arbeit-wirtschaft/esa/emissionenausanlagen/>

Juli 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Messdaten.....	4
2.1	Lage der PM10- Staubquellen und der Luftmessstelle	4
2.2	PM10-Feinstaubbelastung und Windverhältnisse am Standort	5
2.3	Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeiten und PM10 Immissionen.....	6
3	Berechnung der Emissionskonzentrationen mit dem Ausbreitungsmodell Gramm/Gral	11
3.1	Anpassung der Emissionsfaktoren	11
3.2	Ausbreitungsberechnung	12
3.3	Berechnungsergebnisse	14
4	Schlussfolgerungen.....	21
	Literatur	22

1 Einleitung

In der Technischen Grundlage zur Beurteilung diffuser Staubemissionen [BMWF] 2013] wird die Winderosion auf Basis von Windstatistiken (mittlere Windgeschwindigkeit und Böen Häufigkeit) österreichischer Windmessstellen, einer standardisierten Schüttkegeloberfläche sowie einer Threshold Windgeschwindigkeit u_t^* von 0,5 m/s nach den Berechnungsformeln der US-EPA [AP42-13.2.5.-2006] berechnet. In weiterer Folge werden in Abhängigkeit des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit Emissionsfaktoren für die Winderosion angegeben.

Andere Berechnungsmöglichkeiten stammen aus [VDI 3790-3] oder von Modellen, die die Winderosion nicht-industriell genutzter Flächen abschätzen [Wind erosion models].

All diesen Modellen ist gemein, dass die Berechnung der Winderosion von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Die Messung und Auswertung der Staubbelastung bei Starkwindereignissen kann dazu beitragen, die Prognose der Staubemissionen für Starkwindereignisse bei konkreten Anlagentypen, im gegenständlichen Fall einer Schottergrube, zu verbessern.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Basis von langjährigen PM10 Immissionsmessungen im Einflussbereich einer Schottergrube die PM10 Winderosionsfrachten von Starkwindereignissen mit Hilfe des Ausbreitungsmodells Gramm/Gral zu ermitteln. Die Ergebnisse sollen die Methoden der Winderosionsberechnung verbessern.

2 Messdaten

2.1 Lage der PM10- Staubquellen und der Luftmessstelle

Als Untersuchungsobjekt für diese Arbeit dient eine Schottergrube, in deren Nahbereich eine Projektmessstelle mit meteorologischen Daten und einer kontinuierlichen PM10 Messung situiert ist.

Die Schottergrube befindet sich im mittleren Inntal im Bereich der Talsohle. Das Inntal ist in diesem Bereich von Südwest nach Nordost ausgerichtet, die Schottergrube liegt quer zu Talachse und weist offene Flächen von mehreren Hektar auf. Die Abmessungen der Grube betragen insgesamt rund 800 m x 170 m.

Das abgebaute Material wird laufend hinsichtlich der Korngrößenverteilung untersucht. Die mittlere Sieblinie ist in folgender Abbildung ersichtlich und zeigt einen Massenanteil an Partikeln kleiner 63 μm (entspricht dem Anteil an Ton und Schluff) von nur 3,6%.

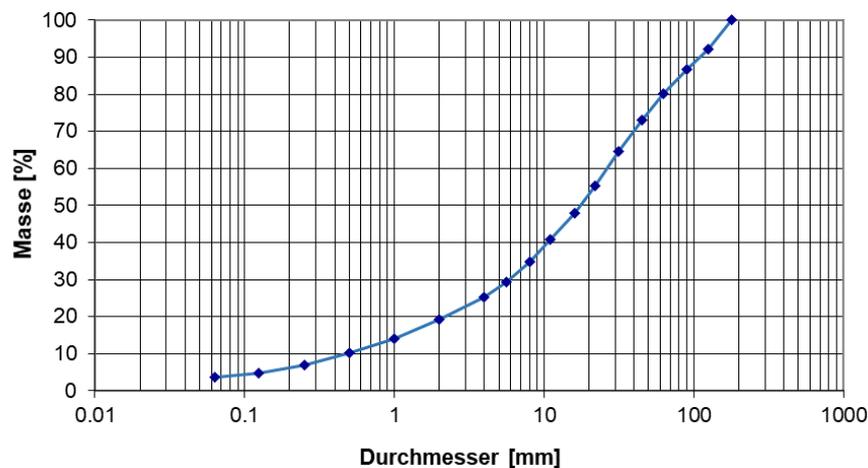


Abbildung 1: Sieblinie des Schotterkörpers.

Die Projektmessstelle „P“ mit der kontinuierlichen Messung von PM10 sowie den meteorologischen Parametern befindet sich östlich der Schottergrube in einem Abstand von rund 30 m zum Grubenrand.

2.2 PM10-Feinstaubbelastung und Windverhältnisse am Standort

Für den Untersuchungszeitraum vom 1.1.2015 bis 31.12.2018 wurde an der Projektmessstelle eine mittlere Konzentration von $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 gemessen. Rund 1,6 km östlich der Projektmessstelle befindet sich eine weitere Messstelle, die als Hintergrundmessstelle „R₅“ fungiert. An dieser Hintergrundmessstelle ergab sich im Untersuchungszeitraum ein PM10 Mittelwert von $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Für Westwindsituationen, also bei Anströmung der Projektmessstelle aus der Schottergrube, ergab sich an der Projektmessstelle ein PM10 Mittelwert von $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An der Hintergrundmessstelle wurde für diese Situationen ein PM10 Mittelwert von $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen.

Die Windmessdaten an der Projektmessstelle „P“ zeigen die klassischen Windverhältnisse in einem Gebirgstal, die meist thermisch angetrieben sind und einem deutlichen Tagesgang unterliegen. In der Nacht entsteht durch das Abkühlen der Erdoberfläche und der darüber liegenden Luft eine hangabwärts und in weiterer Folge eine talauswärts (Bergwind) gerichtete Windströmung (nächtliches Ausfließen). Während des Tages, wenn sich die Luftschicht entlang der Hänge durch Sonneneinstrahlung erwärmt und sich dadurch ein Druckunterschied einstellt, entsteht eine aufwärts bzw. taleinwärts gerichtete Windströmung (thermischer Taleinwind). Diese taleinwärts gerichtete Windströmung weist im Vergleich zum Ausfließen im Mittel eine deutlich höhere Windgeschwindigkeit auf.

Fallweise wird dieses Talwindssystem durch Südföhn oder Westwind bei Störungsdurchgängen überlagert. Insbesondere diese Ereignisse sind häufig mit hohen Windgeschwindigkeiten verknüpft. Abbildung 2 stellt die gemessene Windverteilung dar. Der Jahresmittelwert der gemessenen Windgeschwindigkeit beträgt 2,7 m/s.

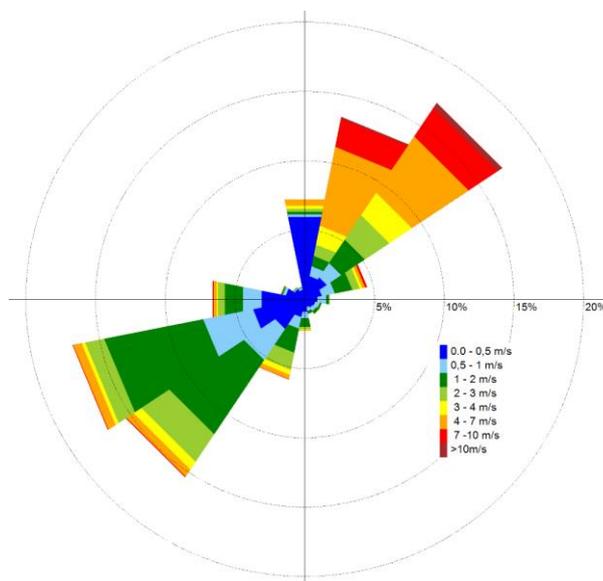


Abbildung 2: gemessene Windrose an der Projektmessstelle „P“

2.3 Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeiten und PM10 Immissionen

Neben den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Daten der Projektmessstelle „P“ wurde in weiterer Folge für eine nahe liegende Referenzmessstelle „R_W“ der Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und den maximalen Windgeschwindigkeiten (Böen) mittels linearer Regression ermittelt, dieser ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Windmessstelle „R_W“ liegt ebenfalls nur wenige Kilometer vom Projektstandort entfernt, zeigt aber, durch Bewuchs und Bebauung verursacht, im Mittel eine deutlich geringere Windgeschwindigkeit von lediglich 1,7 m/s.

Die Regressionsgerade ergibt einen Zusammenhang von

$$\text{Formel 1} \quad v_{B\ddot{o}e} = 1,6 * v_{Mean} + 1,4 \text{ m/s}$$

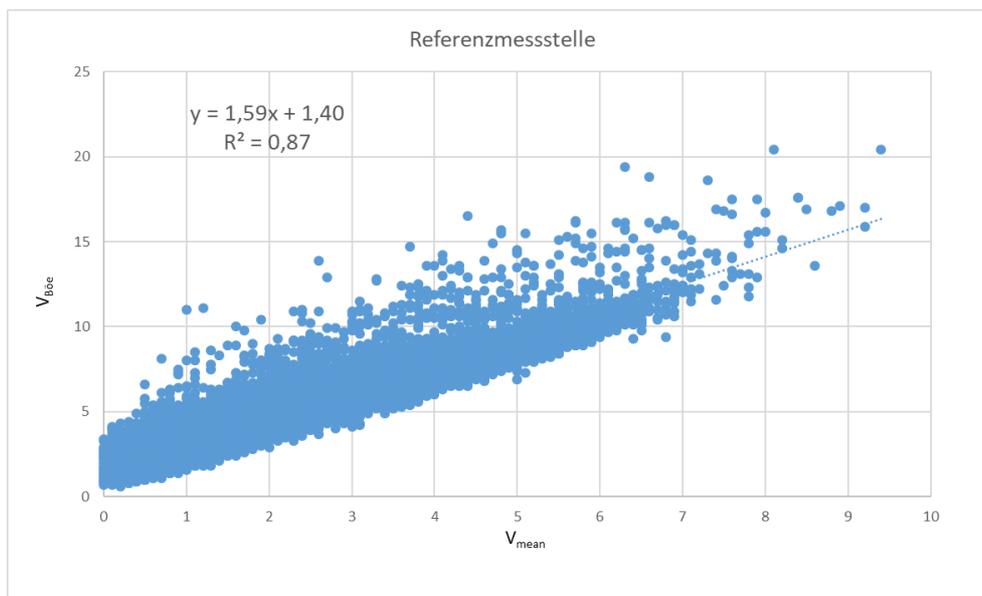


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit (v_{mean}) und den Böen ($v_{B\ddot{o}e}$) an der Referenzmessstelle „R_W“

Wie man in Abbildung 3 erkennt, bildet die Regressionsgerade eine gute Annäherung an den Mittelwert ($R^2 = 0,87$). Die für das Erosionsgeschehen wesentlichen maximalen Böen sind damit aber nicht ausreichend abgebildet. Für die Abschätzung der maximalen Böen ist der in [BMWFJ 2013] angegebene Faktor (siehe Formel 2) besser geeignet, liefert aber im Mittel eine zu hohe Anzahl starker Böen.

$$\text{Formel 2} \quad v_{B\ddot{o}e} = 2,3 * v_{Mean}$$

Betrachtet man an der Referenzmessstelle „R_W“ die West- und Ostwinde getrennt und blendet mittleren Windgeschwindigkeiten von unter 4 m/s aus, zeigt sich, dass die grundsätzlich stärkeren Ostwinde (Taleinwind) weniger Dynamik aufweisen als die im Mittel schwächeren Westwinde, denen jedoch häufiger Frontendurchgänge und Föhnsituationen überlagert sind. Die Ergebnisse dieser richtungsabhängigen Auswertung samt Regressionsgeraden sind in Abbildung 4a und 4b dargestellt. Während die Böen für stärkere Ostwinde im Mittel gut mit der Formel 1 abgebildet werden können, sind die Böen der stärkeren Westwindsituationen besser mit Formel 2 beschreibbar.

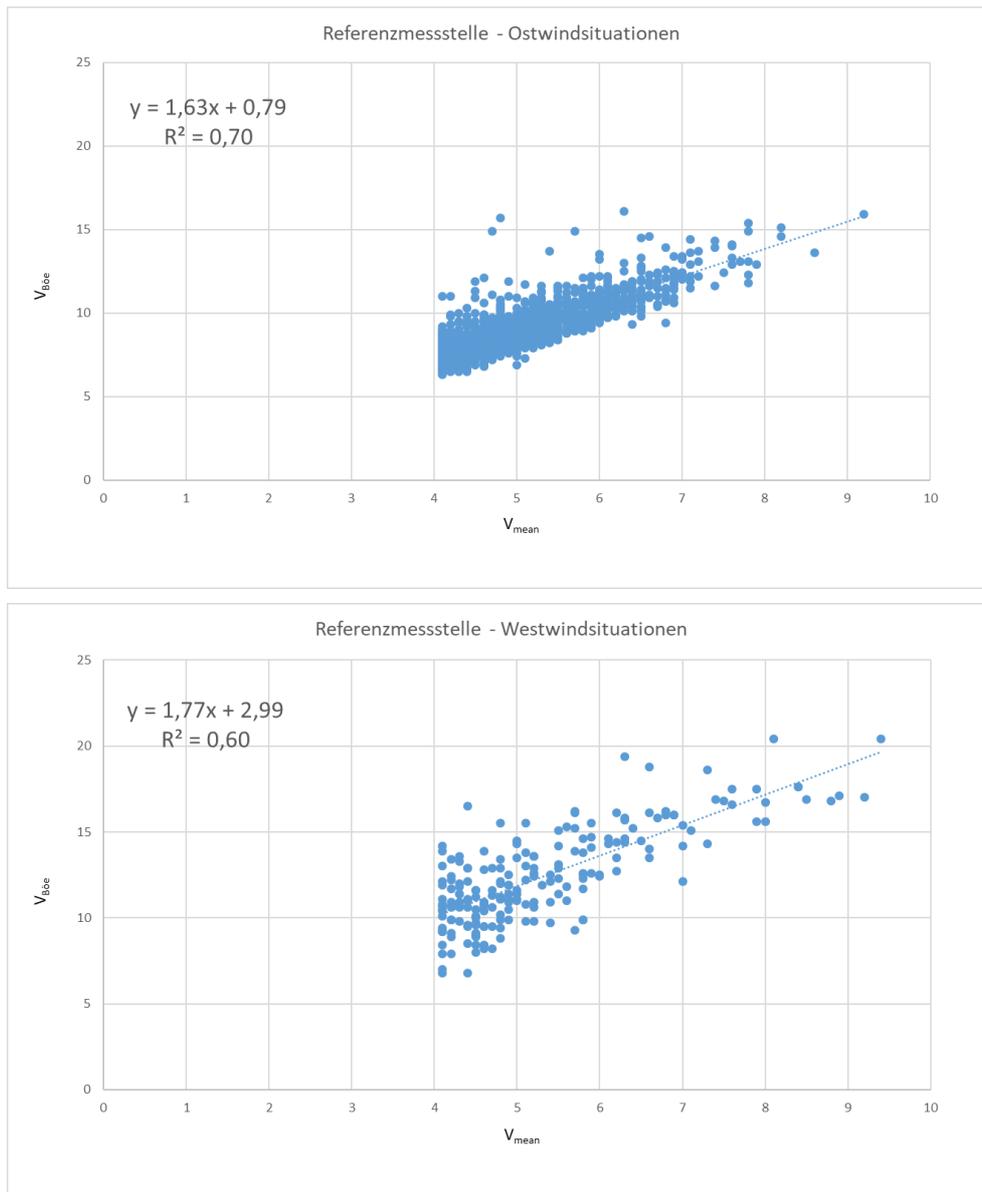
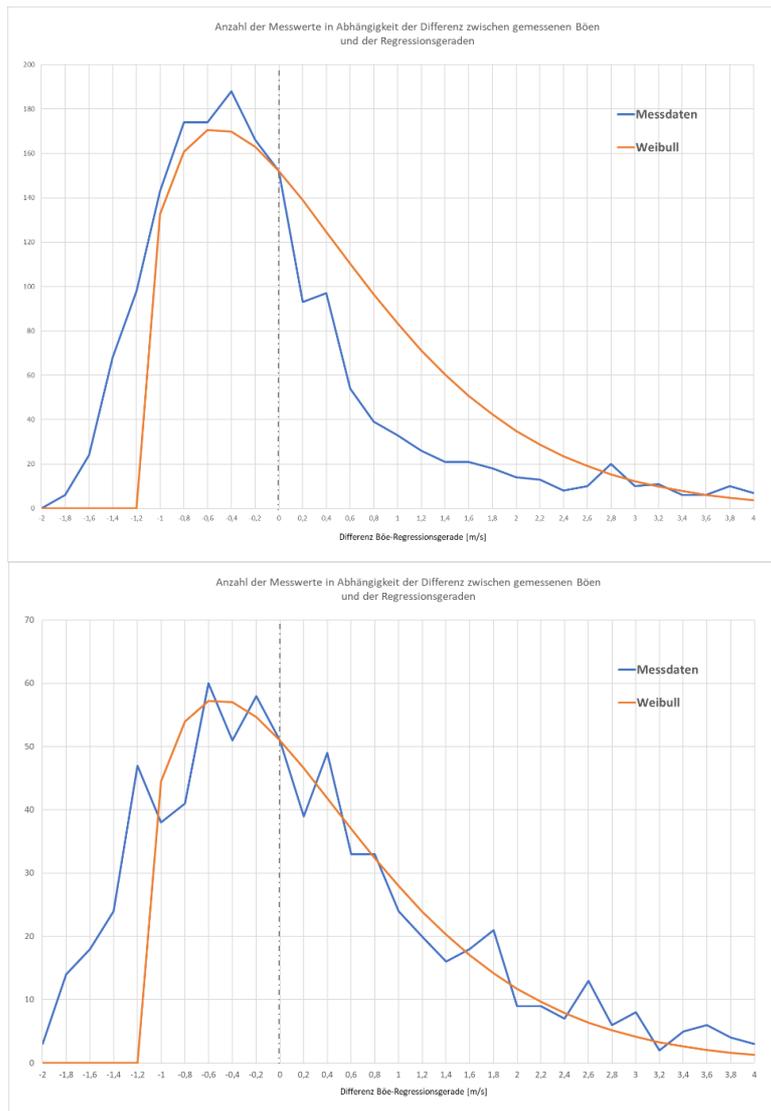


Abbildung 4a und 4b: Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit (v_{mean}) und den Böen ($v_{Böe}$) windrichtungsabhängig für Windgeschwindigkeiten über 4 m/s

Als weitere Annäherung an die gemessene Stärke und Häufigkeit der Böen wurde die Abweichung der gemessenen Böen von der Regressionsgeraden nach Formel 1 für mittlere Windgeschwindigkeiten über 4 m/s in Windgeschwindigkeits-Differenzklassen von 0,2 m/s ermittelt. Die Anzahl der Messwerte in den einzelnen Klassen sind in Abbildungen 5a und 5b dargestellt. Wie bereits in Abbildung 3 erkennt man auch in den Abbildungen 5a und 5b, dass ausgehend von der Regressionsgeraden (Differenzwert = 0) die Spannweite nach unten deutlich geringer ist, als nach oben.

Eine Weibull-Dichtefunktion (siehe Formel 3) mit den Parametern $\lambda = 2,4$ und $k = 1,4$ ist in der Lage, diese Verteilung im Intervall -1 m/s bis + 4 m/s sowohl für den Mittelwert als auch für einzelne Spitzen gut abzubilden.

Formel 3
$$f(x) = \lambda \cdot k \cdot (\lambda \cdot x)^{k-1} \cdot e^{-(\lambda \cdot x)^k}$$



Abbildungen 5a und 5b: gemessene und mit Weibull-Dichtefunktion angenäherte Verteilung der Böen für die Referenz „R_w“ (oben)- und eine weitere Windmessstelle „K“ (unten)

Bei der Auswertung der Feinstaubmessungen an der Projektmessstelle „P“ zeigt sich, dass neben betrieblichen Tätigkeiten auch einzelne Starkwindereignisse zu sehr hohen Feinstaubkonzentrationen führen. Solche Ereignisse sind häufig mit gut sichtbaren Staubaufwirbelungen verbunden. In Tabelle 1 ist ein Beispiel eines solchen Ereignisses, das außerhalb der Betriebszeit der Schottergrube in der Nachtzeit aufgetreten ist, dargestellt.

Datum	PM10 Messwert [mg/m ³]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung [°]
29.04.20xx 23:30	0,045	6,3	222
30.04.20xx 00:00	0,078	5,0	224
30.04.20xx 00:30	0,068	7,3	244
30.04.20xx 01:00	0,135	7,9	260
30.04.20xx 01:30	0,282	7,7	230
30.04.20xx 02:00	0,171	7,0	239
30.04.20xx 02:30	0,119	8,2	262
30.04.20xx 03:00	0,123	11,4	269
30.04.20xx 03:30	0,166	11,1	267
30.04.20xx 04:00	0,175	9,7	266
30.04.20xx 04:30	0,143	9,4	266

30.04.20xx 05:00	0,105	6,3	254
30.04.20xx 05:30	0,038	3,1	191
30.04.20xx 06:00	0,021	3,9	192
30.04.20xx 06:30	0,043	1,8	227
30.04.20xx 07:00	0,068	5,3	233

Tabelle 1: exemplarisches Starkwindereignis in der Nachtzeit

In der Folge wurde die als Halbstundenmittelwerte gemessenen Feinstaubkonzentrationen für den Zeitraum vom 1.1.2015 bis 31.12.2018 in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung ausgewertet. Dabei wurden PM10 Mittelwerte für Windgeschwindigkeitsklassen mit einer Klassenbreite von 1 m/s bei gleichzeitiger Anströmung der Projektmessstelle „P“ aus der Schottergrube gebildet.

Diese Auswertung ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Balken zeigen die PM10 Mittelwerte, die Rauten, auf logarithmischer Skala, die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Windgeschwindigkeitsintervall.

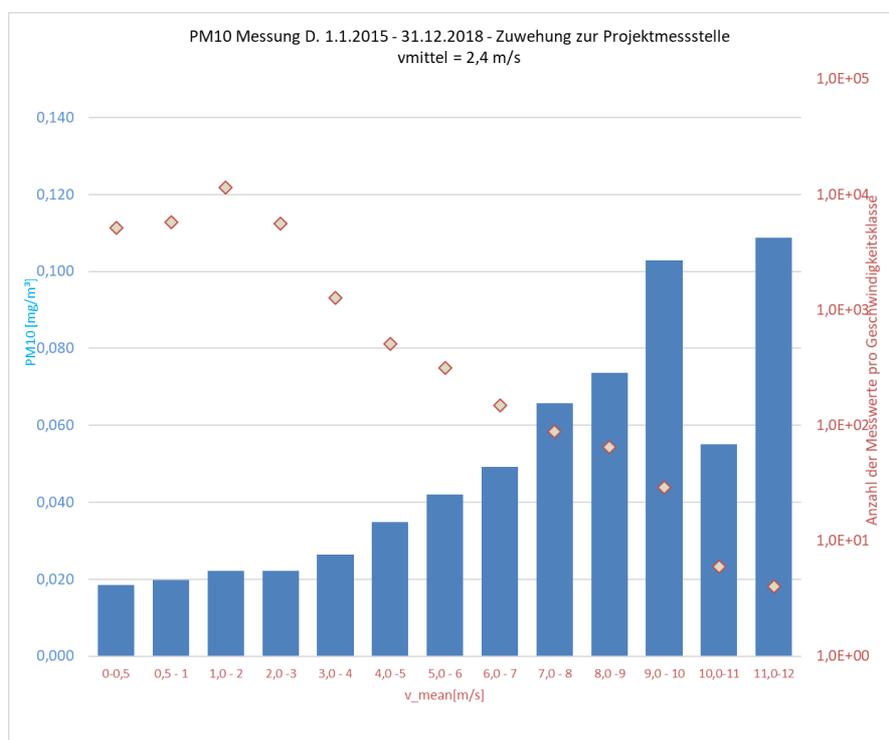


Abbildung 6: PM10 Konzentration in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit an der Projektmessstelle „P“, Auswertung der Westwindsituationen – Abbau und Winderosion

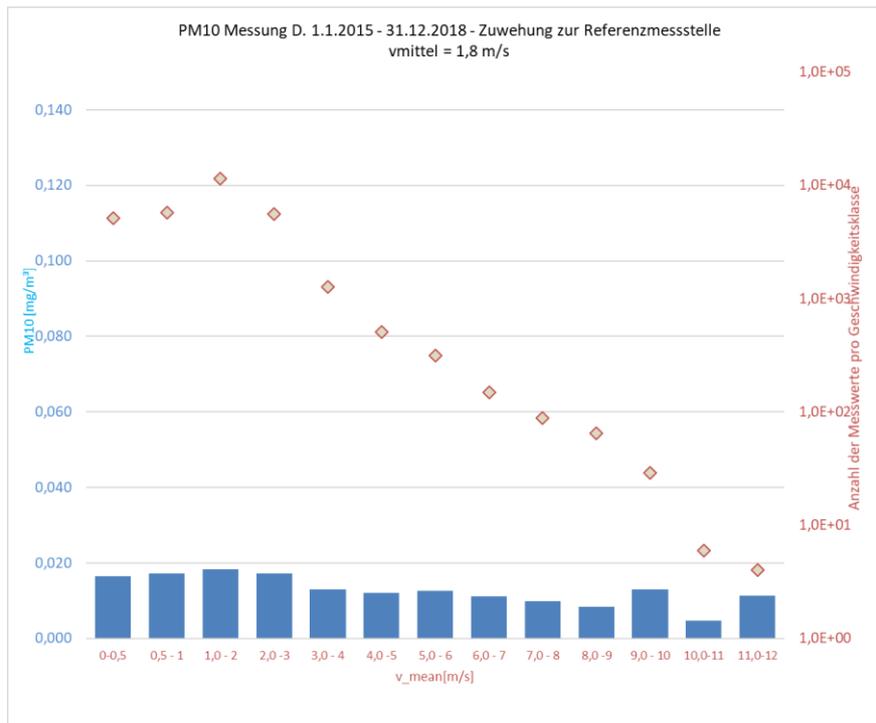


Abbildung 7: PM10 Konzentration in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit an der Referenzmessstelle „R₅“, Auswertung der Westwindsituationen

Obwohl mit steigender Windgeschwindigkeit im Regelfall eine stärkere Durchmischung der Luftschichten einhergeht, wurde ein deutlicher Anstieg der quellenah gemessenen Feinstaubkonzentration mit steigender Windgeschwindigkeit beobachtet (Abbildung 6). An der Projektionsstelle „P“ wurde ein maximaler PM10 Halbstundenstundenmittelwert von rund 450 µg/m³ gemessen.

Zum Vergleich wurde die selbe Auswertung mit gleichem Windrichtungssektor an der Referenzmessstelle „R₅“ vorgenommen. An dieser, von der Schottergrube unbeeinflussten Messstelle, ist mit steigender Windgeschwindigkeit tendenziell eine Verringerung der Feinstaubkonzentration, wohl aufgrund der besseren Durchmischung, feststellbar. Erst bei höheren Windgeschwindigkeiten steigt, eventuell durch lokale Winderosion, die Konzentration leicht an, erreicht aber nicht die Konzentrationen niedriger Windgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 7).

3 Berechnung der Emissionskonzentrationen mit dem Ausbreitungsmodell Gramm/Gral

3.1 Anpassung der Emissionsfaktoren

Durch die von der meteorologischen Ausbreitungssituation abhängige Verdünnung besteht zwischen Emission und Immission ein komplexer, nichtlinearer Zusammenhang. Aus diesem Grund erfolgte zuerst mit Hilfe eines Ausbreitungsmodells eine iterative Annäherung der Emissionsfrachten an die Messergebnisse der Immissionsmessstelle. Dabei wurden im ersten Schritt die Ergebnisse bei den maximalen Windgeschwindigkeiten in Übereinstimmung gebracht und in weiterer Folge wurde die Übereinstimmung für geringere Windgeschwindigkeiten hergestellt.

Zu diesem Zweck erfolgte die Emissionsberechnung in Analogie zu [BMWF] 2013] inklusive des Faktors u_s/u_r zur Berücksichtigung der Windgeschwindigkeitsverteilung auf der Halde nach dem Verfahren gemäß [AP42-13.2.5.-2006], wobei die Threshold Geschwindigkeit und ein genereller Anpassungsfaktor variiert wurden.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Threshold Geschwindigkeit u_t^* die Steigung der Kurve mit ansteigender Windgeschwindigkeit beeinflusst. Um in weiterer Folge die Maximalkonzentration an die Messwerte angleichen zu können, musste die Original-Formel der [AP42-13.2.5.-2006] um einen Anpassungsfaktor m erweitert werden.

Formel 4
$$P_E = m * (58 * (u^* - u_t^*)^2 + 25 * (u^* - u_t^*)) [g/m^2]$$

Die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* wurde ebenfalls nach [AP42-13.2.5.-2006] festgelegt.

Formel 5
$$u^* = 0,053 * u_{10}$$

Die Stärke des Windangriffs und damit die Faktoren u_s/u_r zur Berücksichtigung der Anströmverhältnisse wurde im Sinne der Technischen Grundlage [BMWF] 2013] für eine Kegeloberfläche mit einem Durchmesser von 20 m und einer Höhe von 8,4 m gemäß [AP42-13.2.5.-2006] berücksichtigt.

In Tabelle 2 sind die wesentlichen Kennziffern dieser Parametrisierung wiedergegeben. Die Emissionsberechnung erfolgte für eine Threshold Geschwindigkeit u_t von 0,5 m/s sowie dem neu definierten Anpassungsfaktor $m = 1/12$.

Aus den ermittelten Emissionen werden in Abhängigkeit der Böen-Windgeschwindigkeit Emissionsfaktoren für die GRAL Zeitreihe ermittelt. Im Ausbreitungsmodell kann damit für jede Stunde ein Emissionsfaktor der Winderosion in Abhängigkeit der Böen-Windgeschwindigkeit hinterlegt werden. Für das Ausbreitungsmodell im ebenen Gelände konnten die Böen der Messdaten der Windmessstelle „R_w“ verwendet werden. Für das Ausbreitungsmodell im komplexen Gelände wurden die Böen und in der Folge die Emissionen und Immissionen für drei Varianten, und zwar nach den Formel 1, Formel 2 und mit Hilfe der Weibull Dichtefunktion (Formel 3) ermittelt.

				$u_t^* = 0,5 \text{ m/s}$ $m = 1/12$	Faktoren in der GRAL Zeitreihe
$v_{Böe}$ [m/s]	v_{mean} Formel 1 [m/s]	v_{mean} Formel 2 [m/s]	TSP [g/m ² .h]		
1	0	0	0,0		
2	0	0	0,0		
4	1	1	0,0		
6	3	2	0,0		

8	4	2	0,0	
10	5	3	0,0	0,00
12	6	4	0,0	0,01
14	8	5	0,1	0,03
16	9	6	0,8	0,28
18	10	7	1,1	0,42
20	12	8	1,6	0,59
22	13	9	2,1	0,78
24	14	10	2,7	1,00

Tabelle 2: Parametrisierung der Emissionsberechnung

Der Feinstaub Anteil PM10 wurde nach [BMWF] 2013] mit 50 % der ermittelten TSP Emission angesetzt.

3.2 Ausbreitungsberechnung

Die Ausbreitungsberechnung erfolgte mit dem Lagrange'sche Partikelmodell GRAL Version 20.09 [ÖTTL 2019]. Bei Lagrange'sche Partikelmodellen wird die Schadstoffausbreitung durch eine große Anzahl von Teilchen simuliert, deren Bewegung durch das vorgegebene Windfeld sowie einer überlagerten Turbulenz bestimmt ist. Für die Bestimmung von Immissionskonzentrationen werden in einem festgelegten Gitter zu jedem Zeitpunkt die Anzahl an Teilchen in jedem Gittervolumen ermittelt und über die Zeit integriert.

Dieses Modellsystem entspricht dem Stand der Technik und wird den besonderen Ansprüchen bei Simulationen im komplexen Gelände und bei windschwachen Wetterlagen gerecht. Die Qualitätssicherung erfolgt durch laufende Validierungsaktivitäten anhand von Daten aus Feldexperimenten. Programmstruktur und Validierungsergebnisse wurden bzw. werden in internationalen Fachzeitschriften bzw. durch Vorträge auf internationalen Konferenzen dokumentiert, wodurch die wissenschaftliche Qualität sichergestellt werden soll.

Für die Ausbreitungsberechnung wurde eine Flächenquelle definiert, die die offenen Bereiche der Schottergrube umfasst.

In der Folge wurden mehrere Varianten berechnet. In der Variante mit ebenem Gelände wurde die Flächenquelle mit dem Quellterm belegt, wobei die Staubfreisetzung in Abhängigkeit der gemessenen Windgeschwindigkeitsböen festgelegt wurde.

Für die Varianten im komplexen Gelände wurde die Staubfreisetzung in Abhängigkeit der modellierten mittleren Windgeschwindigkeit (GRAMM Windrose siehe Abbildung 8) und der daraus abgeschätzten Böen gemäß den Formeln 1 und 2 und auf Basis der Weibull-Funktion (siehe Abbildung 9) festgelegt. Die berechnete Windrose ergibt im GRAMM Windfeld im Jahresmittel mit 2,4 m/s geringere, im GRAL Windfeld im Jahresmittel mit 3,0 m/s höhere Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum gemessenen Wind. Eine Analyse der GRAL Windvektoren zeigt, dass das Modell den Strömungseffekt an der Geländekante des Abbaus, in dessen unmittelbarer Nähe die Messstelle „P“ liegt, überschätzt.

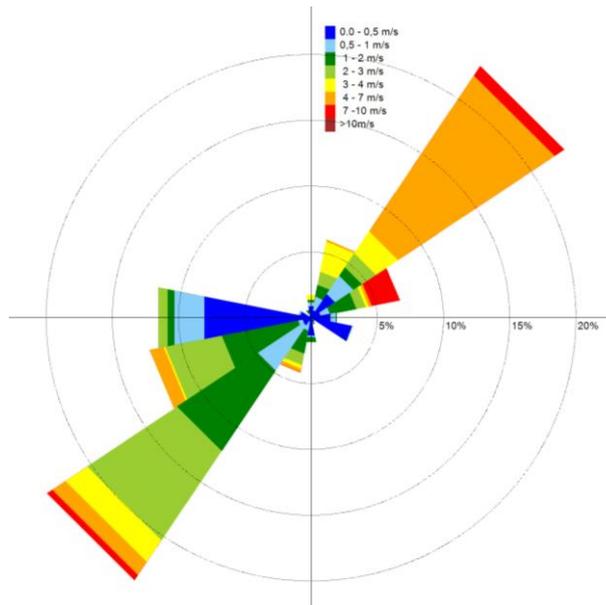


Abbildung 8: berechnete Windrose (GRAMM) an der Projektmessstelle „P“

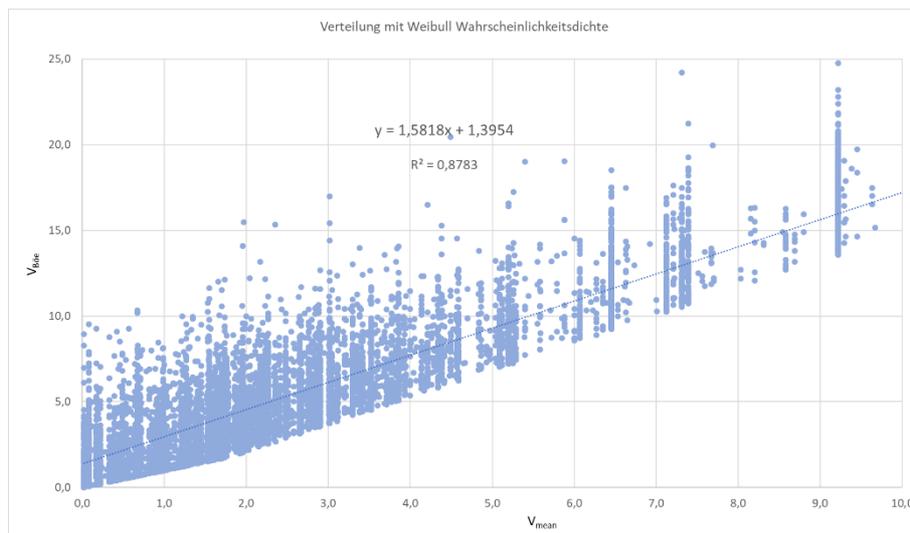


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und den Böen der berechneten GRAMM/GRAL Windrose mit der in Abschnitt 2.2 ermittelten Weibull-Funktion

Als alternative Variante wurde eine GRAL-Testversion entwickelt. Diese Testversion ermittelt die Emissionsstärke der Winderosion in Abhängigkeit der lokalen GRAL Windgeschwindigkeit für jede Flow Field Zelle, der Formel 2 und den Faktoren der Tabelle 3. Weiters wurde für die Emission eine Decay-Rate berücksichtigt (Reduktion des verfügbaren abwehfähigen Materials bei lang andauernden Starkwindphasen). Da diese GRAL Version die Emissionsstärke der Winderosion unter Berücksichtigung der lokalen Geländegegebenheiten berechnet, muss der Faktor u_s/u_r (zur Abschätzung der Anströmverhältnisse) bei der Berechnung der Basisemission nicht angewandt werden. Diese GRAL Testversion ist aktuell nicht offiziell verfügbar. Für diese Testversion ergeben sich, ohne Berücksichtigung des Faktors u_s/u_r , folgende Emissionsfrachten:

		$u_t^* = 0,5 \text{ m/s}$ $m = 1/12$
$v_{Böe}$ [m/s]	v_{mean} Formel 2 [m/s]	TSP [g/m ² .h]
1	0	0,0
2	0	0,0
4	1	0,0
6	2	0,0
8	2	0,0
10	3	0,1
12	4	0,5
14	5	1,0
16	6	1,7
18	7	2,5
20	8	3,5
22	9	4,6
24	10	5,8

Tabelle 3: Parametrisierung der Emissionsberechnung ohne u_t^*/u_r

3.3 Berechnungsergebnisse

Die Berechnung mit GRAL erfolgte flächenhaft und punktuell für die Projektmessstelle „P“ mit Hilfe der gemessenen Winddaten für ebenes Gelände. Weiters erfolgten Berechnungsvarianten für komplexes Gelände mit einer berechneten Meteorologie auf Basis des mesoskaligen Windfeldmodells GRAMM (siehe Abbildung 8) und des mikroskaligen Windfeldmodells in GRAL.

An der Messstelle „P“ kann in der Folge eine Immissionszeitreihe der berechneten PM10 Konzentration ausgewertet werden. Diese Zeitreihe wird in der Folge, wie bereits bei den Messwerten dokumentiert, für Windgeschwindigkeitsklassen mit einer Breite von 1 m/s bei gleichzeitiger Anströmung der Projektmessstelle aus der Schottergrube ausgewertet. Um die Vorbelastung zu berücksichtigen, wurde den PM10 Rechenwerten der langjährige PM10 Messwert an der Projektmessstelle von 19 µg/m³ zugeschlagen.

Die Rechenergebnisse für ebenes Gelände sind in Abbildung 10 dargestellt.

Die für gegenständlichen Standort berechneten Jahresemissionen und die daraus abgeleiteten durchschnittlichen stündlichen Emissionen der untersuchten Methoden sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Variante		Jahresfracht		PM10 Mittlere stündliche Emission
		TSP	PM10	
		[kg/ha]	[kg/ha]	[g/m ² /h]
A	Ebenes Gelände, Böen der Windmessstelle „R _w “	360	180	0,002
B	Mit Gelände Böen nach Formel 1	3000	1500	0,02
C	Mit Gelände Böen nach Formel 2	10800	5400	0,06
D	Mit Gelände Böen mit Weibull Verteilung	2800	1400	0,02
E	Mit Gelände; Emissionsberechnung mit lokalem GRAL Windfeld nach Formel 2	4500	2250	0,03

Tabelle 4: Emissionsfrachten für PM10 im Jahresmittel

Bei diesen Werten ist zu berücksichtigen, dass die Emissionsfrachten von der lokalen Meteorologie, insbesondere der Böenhäufigkeit und der Böenstärke sowie der Stärke des Windangriffs (Anstellwinkel der Fläche bzw. Fläche im Luv oder Lee einer Schüttung) und damit von den orografischen Verhältnissen innerhalb der Winderosions-Flächenquelle abhängen. Die Verdünnung am Ausbreitungsweg wird zudem wesentlich von der Meteorologie sowie den Ausbreitungsbedingungen beeinflusst. Eine jahresdurchschnittliche Emissionsfracht (mittlere stündliche Emission) ist daher für detaillierte Betrachtungen nicht geeignet und kann bei der Übertragung auf unterschiedliche Standorte Unsicherheiten in sich bergen.

In den hier beschriebenen Untersuchungen wurde für sämtliche Berechnungen eine Maximalemission vorgegeben, die mit einer windgeschwindigkeitsabhängigen variablen Zeitreihe moduliert wird. Im Fall der GRAL Testversion wird diese Emissionsmodulation durch das Ausbreitungsmodell selbst für jede Flow-Field Zelle und jede meteorologische Situation der transienten GRAL Zeitreihenberechnung ermittelt. Damit wurden für jede Zelle sowohl die lokalen meteorologischen als auch topografischen Verhältnisse berücksichtigt.

Im gegenständlichen Untersuchungsgebiet war durch den laufenden Abbau ein ständiger Materialumschlag gegeben, sodass an den Oberflächen durch Bearbeitungen und Fahrbewegungen stets ausreichend abwehfähiges Material zur Verfügung stand.

Die vergleichsweise geringen Emissionen der Variante im ebenen Gelände sind dem Umstand geschuldet, dass in diesem Fall die gemessenen Böen der Windmessstelle „R_w“ zur Emissionsberechnung verwendet wurden, die mit 1,7 m/s eine deutlich geringere mittlere Windgeschwindigkeit als die Projekt-Windmessstelle „P“ mit 2,7 m/s aufweist und der Einfluss des Geländes auf die Ausbreitung nicht berücksichtigt ist.

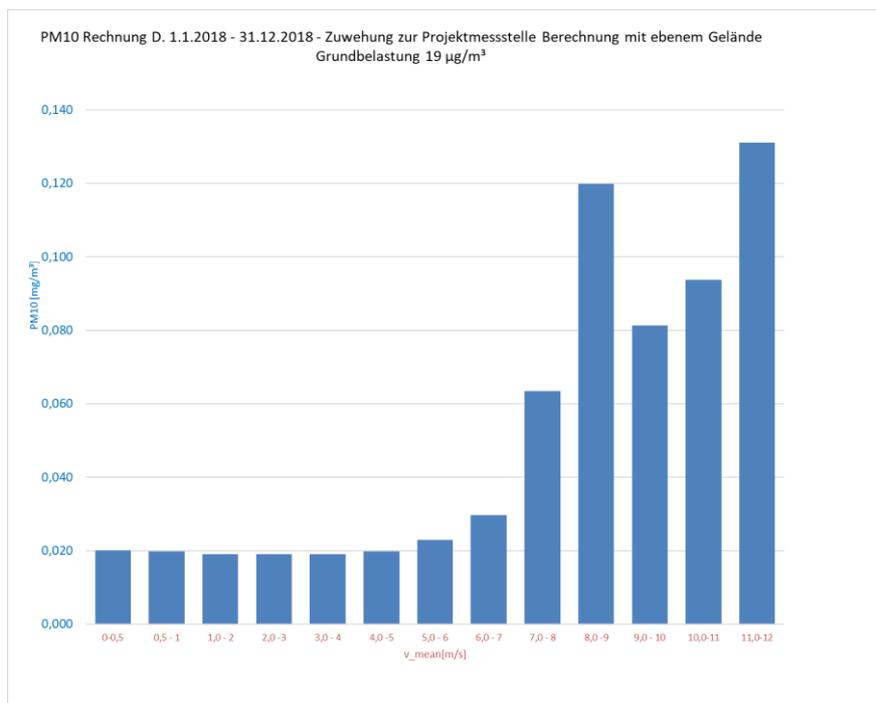


Abbildung 10 Variante A: Rechenergebnisse der PM10 Konzentration an der Projektmessstelle „P“ ebenes Gelände, gemessene Meteorologie – Auswertung der Westwindsituationen – nur Winderosion

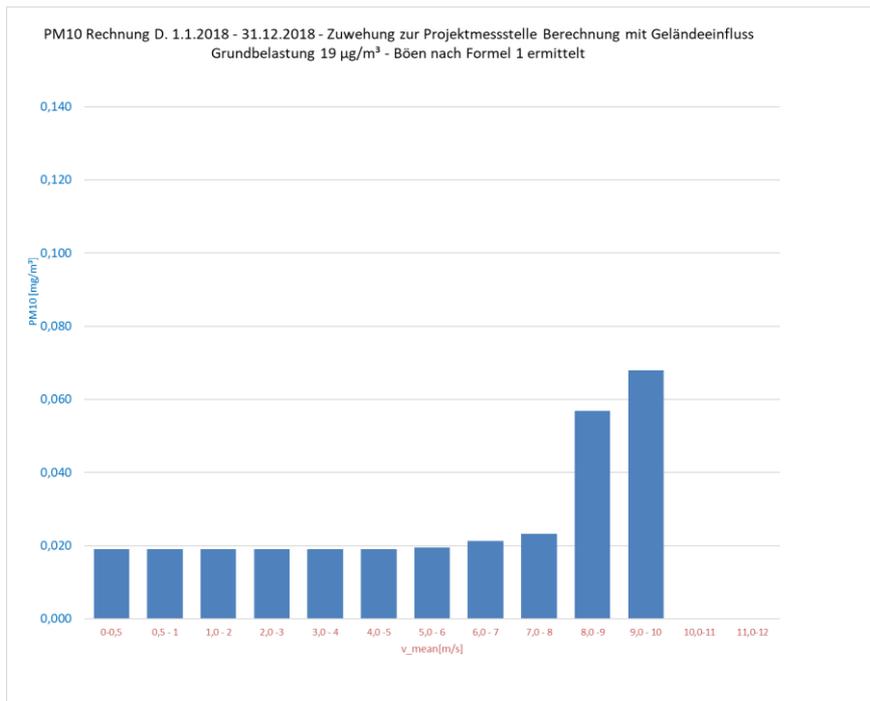


Abbildung 11 Variante B: Rechenergebnisse der PM10 Konzentration an der Projektmessstelle „P“, komplexes Gelände, GRAMM Meteorologie, Böen nach Formel 1 – Auswertung der Westwindsituationen – nur Winderosion

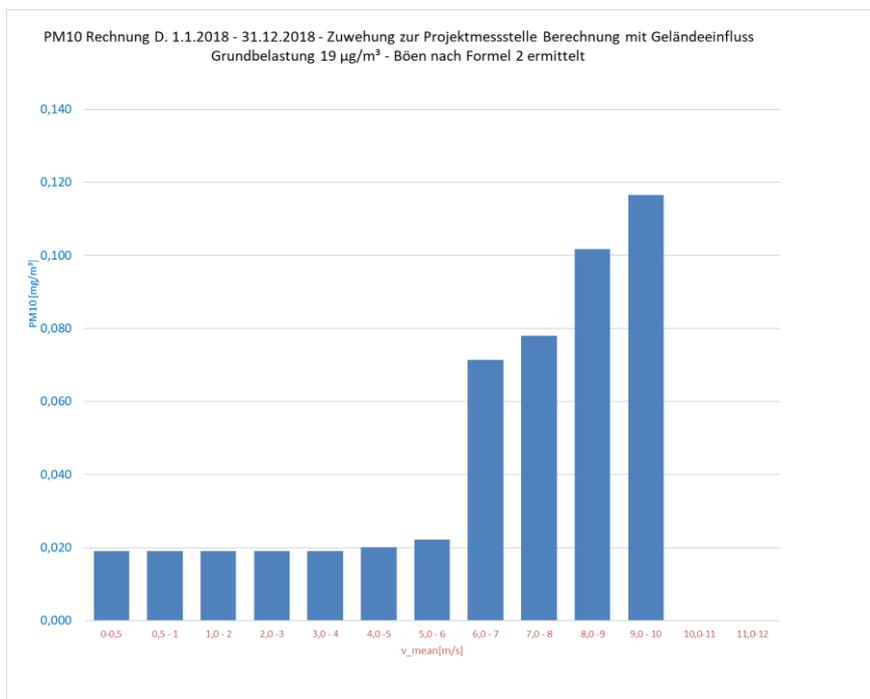


Abbildung 12 Variante C: Rechenergebnisse der PM10 Konzentration an der Projektmessstelle „P“, komplexes Gelände, GRAMM Meteorologie, Böen nach Formel 2 – Auswertung der Westwindsituationen – nur Winderosion

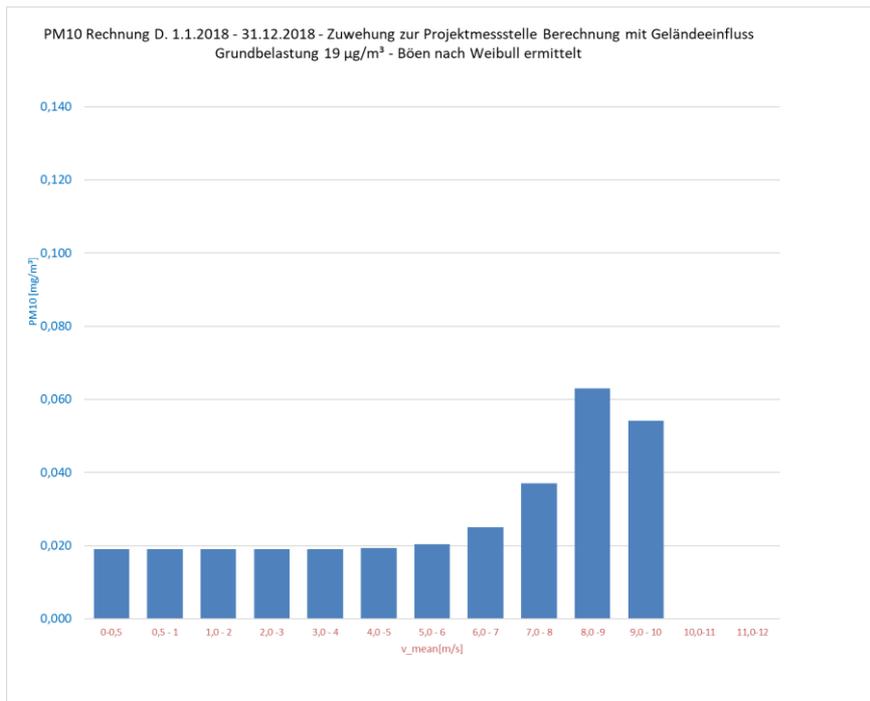


Abbildung 13 Variante D: Rechenergebnisse der PM10 Konzentration an der Projektmessstelle „P“, komplexes Gelände, GRAMM Meteorologie, Böen mit Weibull Funktion ermittelt - Auswertung der Westwindsituationen – nur Winderosion

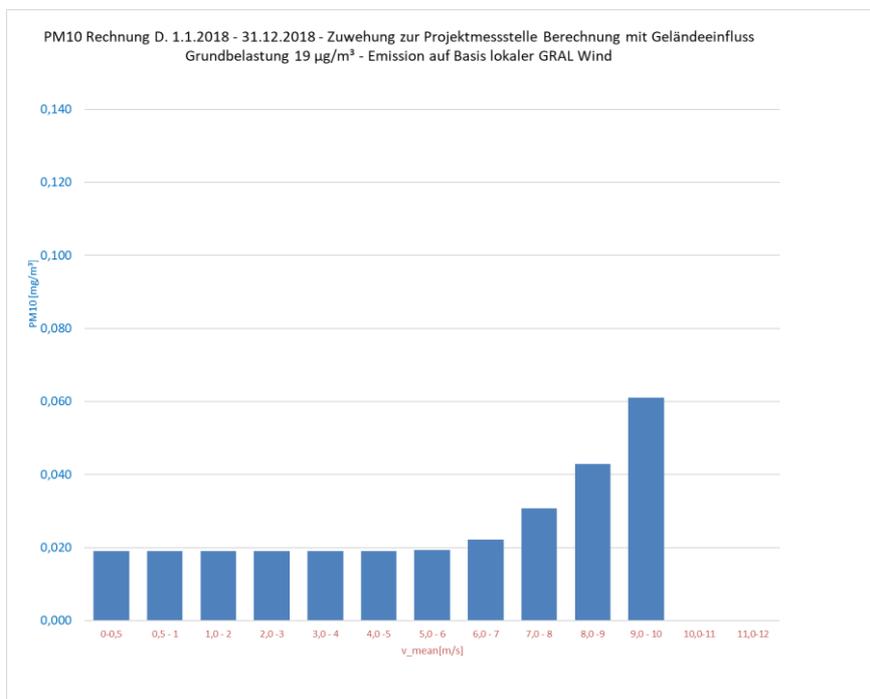


Abbildung 14 Variante E: Rechenergebnisse der PM10 Konzentration an der Projektmessstelle „P“, komplexes Gelände, GRAMM Meteorologie, Emission und Böen mit Formel 2 auf Basis lokaler GRAL Windstärken ermittelt
Auswertung der Westwindsituationen – nur Winderosion

Ohne den Anpassungswert m von 1/12 hätte sich in allen Fällen eine erhebliche Überbefundung der berechneten Immissionswerte ergeben, mit einer höheren Threshold Geschwindigkeit wäre die

Maximalemission zwar gesunken, die Emissionen bei geringeren Windgeschwindigkeiten aber rascher gegen Null tendiert.

Datum		PM10 Messwert [mg/m ³]	PM10 Rechenwert [mg/m ³]	Windgeschwindigkeit t [m/s]	Windrichtung [°]
29.04.20xx	22:00	0,025	0,019	4,6	222
29.04.20xx	23:00	0,037	0,019	5,7	223
30.04.20xx	00:00	0,073	0,120	7,5	252
30.04.20xx	01:00	0,209	0,023	7,3	235
30.04.20xx	02:00	0,145	0,027	9,8	266
30.04.20xx	03:00	0,144	0,094	10,4	267
30.04.20xx	04:00	0,159	0,031	7,8	261
30.04.20xx	05:00	0,072	0,019	3,5	191
30.04.20xx	06:00	0,032	0,027	3,5	232
30.04.20xx	07:00	0,068	0,019	3,8	254

Tabelle 5 Variante A: Rechenwerte (Ausschnitt aus der Immissionszeitreihe im ebenen Gelände)

Im Modell für komplexes Gelände wurden auf Basis der mittleren Stundenwerte der GRAMM Windgeschwindigkeit Böen hochgerechnet (siehe Kapitel 2.3) und für die Ermittlung der Emissionsfaktoren verwendet, was zu etwas geringeren Rechenwerten führte, als die Verwendung der gemessenen Böen im Modell mit ebenem Gelände.

Die berechneten Immissionswerte im komplexen Gelände mit Abschätzung der Böen nach Formel 2 sind in Tabelle 6 dargestellt.

Datum		PM10 Messwert [mg/m ³]	PM10 Rechenwert [mg/m ³]	Windgeschwindigkeit t [m/s]	Windrichtung [°]
29.04.20xx	22:00	0,025	0,069	6,5	225
29.04.20xx	23:00	0,037	0,088	7,7	230
30.04.20xx	00:00	0,073	0,125	9,2	230
30.04.20xx	01:00	0,209	0,125	9,2	230
30.04.20xx	02:00	0,145	0,125	9,2	230
30.04.20xx	03:00	0,144	0,125	9,2	230
30.04.20xx	04:00	0,159	0,021	5,2	249
30.04.20xx	05:00	0,072	0,020	4,5	200
30.04.20xx	06:00	0,032	0,019	3,9	228
30.04.20xx	07:00	0,068	0,021	5,2	249

Tabelle 6 Variante C: Rechenwerte (Ausschnitt aus der Immissionszeitreihe im komplexen Gelände)

Böen nach Formel 2 abgeschätzt

Auch wenn die Böen mit der Weibull Funktion ermittelt werden, liegen die Maximalwerte für die PM10 Immission unter den Werten für ebenes Gelände.

Datum		PM10 Messwert [mg/m ³]	PM10 Rechenwert [mg/m ³]	Windgeschwindigkeit t [m/s]	Windrichtung [°]
29.04.20xx	22:00	0,025	0,024	6,5	225
29.04.20xx	23:00	0,037	0,021	7,7	230

30.04.20xx	00:00	0,073	0,076	9,2	230
30.04.20xx	01:00	0,209	0,057	9,2	230
30.04.20xx	02:00	0,145	0,076	9,2	230
30.04.20xx	03:00	0,144	0,057	9,2	230
30.04.20xx	04:00	0,159	0,019	5,2	249
30.04.20xx	05:00	0,072	0,019	4,5	200
30.04.20xx	06:00	0,032	0,019	3,9	228
30.04.20xx	07:00	0,068	0,019	5,2	249

*Tabelle 7 Variante D: Rechenwerte (Ausschnitt aus der Immissionszeitreihe im komplexen Gelände)
Böen mit Weibull Funktion abgeschätzt*

Datum		PM10 Messwert [mg/m ³]	PM10 Rechenwert [mg/m ³]	Windgeschwindigkeit t [m/s]	Windrichtung [°]
29.04.20xx	22:00	0,025	0,022	6,5	225
29.04.20xx	23:00	0,037	0,059	7,7	230
30.04.20xx	00:00	0,073	0,098	9,2	230
30.04.20xx	01:00	0,209	0,087	9,2	230
30.04.20xx	02:00	0,145	0,087	9,2	230
30.04.20xx	03:00	0,144	0,084	9,2	230
30.04.20xx	04:00	0,159	0,025	5,2	249
30.04.20xx	05:00	0,072	0,019	4,5	200
30.04.20xx	06:00	0,032	0,019	3,9	228
30.04.20xx	07:00	0,068	0,019	5,2	249

*Tabelle 8 Variante E: Rechenwerte (Ausschnitt aus der Immissionszeitreihe im komplexen Gelände)
Emission und Böen auf Basis der lokalen GRAL Windstärken ermittelt*

Bei näherer Betrachtung der Zeitreihen der Messungen sowie der einzelnen Berechnungsvarianten zeigt sich, dass die Winderosion stark von Einzelereignissen geprägt ist.

Betrachtet man die tägliche Emissionsfracht, zeigt sich, dass an Spitzentagen, wie dem 30.4., eine PM10 Tages-Emissionsfracht von rund 6 g/m² auftritt (Variante mit der GRAL Testversion), die Emission dieses Tages entspricht damit rund 3 % der Jahresfracht. In dieser Variante treten an 180 Tagen im Jahr keine Winderosionen auf.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Berechnungsvarianten zusammengefasst. Die tatsächlich gemessenen PM 10 Immissionen umfassen die Winderosion aber auch die Emissionen durch den Abbau (Fahrbewegungen, Manipulationen). Somit ist beim direkten Vergleich der Gesamtergebnisse für Fälle mit annähernd gleichen oder höheren Emissionen durch Winderosion von einer Überschätzung der Winderosion auszugehen.

Es fällt auf, dass in der Variante im ebenen Gelände unter Heranziehung der gemessenen Böen trotz geringer Jahresmission am Messpunkt vergleichsweise hohe Staubkonzentrationen ermittelt werden. Dies erklärt sich im Wesentlichen mit der windrichtungsabhängigen Stärke der Böen (siehe Abbildung 4, die Messstelle wird bei Westwind aus dem Abbaugelände angeströmt) und der geringeren Verdünnung ohne Berücksichtigung der Geländeeinflüsse im Ausbreitungsmodell.

	Gemessen	Berechnet				
	Winderosion und Abbau	Winderosion ohne Abbau				
		Eben	Mit Gelände			
		Gemessene Böe	Böe Formel 1	Böe Formel 2	Böe Weibull	Emission und Böe GRAL Wind
Variante		A	B	C	D	E
	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
PM10 HMW_{max}	450	800	80	130	80	98
PM10 JMW	4,0	0,5	0,2	0,7	0,2	0,2
PM10 $\bar{v} = 4 - 6 \text{ m/s}$	38	21	19	21	20	19
PM10 $\bar{v} = 6 - 8 \text{ m/s}$	49	47	22	75	31	26
PM10 $\bar{v} = 8 - 10 \text{ m/s}$	70	101	62	109	59	52
PM10 $\bar{v} = 10 - 12 \text{ m/s}$	103	112	-*	-*	-*	-*

Tabelle 9: Zusammenfassung der gemessenen und modellierten PM10 Immissionen

* im GRAMM bzw. GRAL Windmodell werden diese (selten aufgetretenen) Spitzenwindgeschwindigkeiten nicht erreicht

4 Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Feinstaub-Messergebnisse einer Projektmessstelle an einer Schottergrube hinsichtlich der Winderosion hat gezeigt, dass die Berechnungsmethode nach US-EPA [AP42-13.2.5.-2006] in Kombination mit einem Ausbreitungsmodell und einer Zeitreihenrechnung mit windgeschwindigkeitsabhängigem Emissionsansatz grundsätzlich geeignet ist, gemessene Immissionskonzentrationen für Starkwindereignisse zu modellieren. Voraussetzung hierfür ist, dass ein Schwellenwert für die Threshold Geschwindigkeit von 0,5 m/s und ein neu eingeführter Anpassungsfaktor von 1/12 berücksichtigt werden.

Die Anwendung einer Threshold Geschwindigkeit von 1,02 ("Overburden" d.h. für den Abraum) nach US-EPA [AP42-13.2.5.-2006] würde bei der höchsten Geschwindigkeitsklasse (mittlere Windgeschwindigkeit 11 – 12 m/s) zu einer vergleichbaren Emission führen, für geringe Windgeschwindigkeiten eine Unterbefundung verursachen.

Die hier mit dem erweiterten Emissionsansatz ermittelte mittlere jährliche Winderosion liegt – mit Ausnahme der Böen Abschätzung nach Formel 2 - mit Werten für TSP zwischen von 0,4 t/(ha.a) bis von 4,5 t/(ha.a) in einer Größenordnung, die in der Literatur [FiBL, 2011] für ausgetrocknete Feuchtschwarzerden in Österreich angegeben wird (0 bis 5,4 t/(ha.a)). Die Anwendung der Formel 2 ergibt bei dieser Betrachtung im Jahresmittel eine Emission von über 10 t/(ha.a).

Eine besondere Bedeutung für die Winderosionsberechnung kommt der Ermittlung der Böen Häufigkeit und Stärke zu. Im Idealfall stehen Messdaten für die mittlere Windgeschwindigkeit und die Windböen zur Verfügung. Ist dies nicht der Fall, ist für eine Abschätzung der maximalen Böen-Geschwindigkeiten und der maximalen Stundenwerte der in [BMWF] 2013] angeführte Faktor von 2,3 in Bezug auf die mittlere stündliche Windgeschwindigkeit geeignet. Während mit dieser Methode die Maximalwerte gut abgeschätzt werden können, erfolgt im Jahresmittel eine Überbefundung. Die Heranziehung einer Weibull-Verteilung für die Ermittlung der Böen für berechnete Windfelder kann die gemessene Häufigkeit und Stärke der Böen besser abbilden.

Die Verwendung der GRAL Windrose an einem Punkt zur Emissionsberechnung kann zu erheblichen Über- oder Unterschätzungen der Emissionsfrachten führen. Eine weitere Differenzierung ist daher die lokale Ermittlung der Windstärken auf Basis des prognostischen GRAL Windfelds und die Durchführung der Emissionsberechnung in Abhängigkeit der lokalen Windstärke auf Ebene des GRAL Flow-Field Rasters. Eine solche Berechnung wurde testweise im Ausbreitungsmodell GRAL integriert. Damit ist die Abschätzung der Faktoren u_z/u_r (siehe Emissionsberechnung Seite 11) nicht notwendig, da die lokalen Windstärken in Abhängigkeit der mikroskaligen Geländestrukturen prognostisch berechnet werden. Außerdem kann mit dieser Methode die Abnahme des Emissionspotentials während lang andauernder Starkwindphasen berücksichtigt werden.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurden gleichzeitig mit Starkwindereignissen einhergehende Niederschläge nicht berücksichtigt. Wenn mit der hier vorgeschlagenen Methode der Einfluss der Winderosion auf den Jahresmittelwert ermittelt wird, sollte der mit Starkwindereignissen fallweise einhergehende Niederschlag ebenfalls berücksichtigt werden. Dies wäre im GRAL Modell beispielsweise durch die zusätzliche Anwendung einer stündlichen Emissionszeitreihe möglich.

Literatur

- [AP42] U.S. Environmental Protection Agency AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources
- [AP42-13.2.5.-2006] Industrial wind erosion
- [AP42-13.2.X-2006] Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Dust Emission Factors
- [BMWFJ 2013] Technische Grundlage zur Beurteilung diffuser Staubemissionen) Hg.: Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013
- [FiBL, 2011] Lindenthal T., Rudolph G., Theurl M., Hörtenhuber S., Kraus G., Biologische Bodenbewirtschaftung als Schlüssel zum Klimaschutz in der Landwirtschaft, Hg.: FiBL Österreich/Austria, September 2011
- [ÖTTL 2019] D. Öttl, Documentation of the Lagrangian Particle Model GRAL (Graz Lagrangian Model) Vs. 20.1, Department 15 Energy, Housing, Technology, Dezember 2019
- [VDI 2584] VDI 2584:1997-10 Emissionsminderung - Naturstein-Aufbereitungsanlagen in Steinbrüchen
- [VDI 3790-3] VDI-Richtlinie 3790 Blatt 3; Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern; VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie, Jänner 2010
- [Wind erosion models] Jarraha M., Mayela S., Tatarkob J., Funk R., Kukaa K., A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity Hg: Catena - An Interdisciplinary Journal of Soil Science - Hydrology - Geomorphology focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2020