



SWK GmbH & Co. KG

Betriebsstandort Fischersberg

Sprengerschütterungsprognosen

(13.12.2023)

Prof. Dr.-Ing. Heiko Rahm

von der IHK Ulm öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baudynamik



Inhalt

1	Allgemeines	3
1.1	Vorbemerkungen	3
1.2	Vorhabenbeschreibung.....	4
1.3	Aufgabenstellung des vorliegenden Gutachtens.....	6
2	Immissionsprognose an der Nachbarbebauung im Fernfeld.....	7
2.1	Prognoseformeln	7
2.2	Entfernungen vom Steinbruch „Fischersberg“	8
2.3	Anhaltswerte nach DIN4150	9
2.4	Strengtechnische Daten.....	11
2.5	Prognose der Sprengerschütterungen im Fernfeld	11
2.6	Fazit der Immissionsprognose im Fernfeld	12
3	Immissionsprognose an WEA im Nahfeld.....	13
3.1	Entfernung der WEA vom Steinbruch „Fischersberg“	13
3.2	Sprengtechnische Daten.....	14
3.3	Prognose der Sprengerschütterungen im Nahfeld.....	15
3.4	Vereinfachte Bewertung der WEA als Industriebauwerk.....	15
3.5	Auswertung der Erschütterungsmessungen	17
3.6	Bewertung der WEA	20
3.6.1	Baudynamische Eigenschaften der WEA	20
3.6.2	Vergleich der Antwortspektren mit dem Erdbebennachweis.....	22
3.2	Fazit der Immissionsprognose im Nahfeld	23
4	Zusammenfassung der Erschütterungsprognosen	24

(Prof. Dr.-Ing. H. Rahm)



Biberach, den 13.12.2023



1 Allgemeines

1.1 Vorbemerkungen

Auftraggeber: SWK Schotterwerk Kirchen GmbH & Co. KG
Zum Hochgericht 9
89597 Munderkingen/Donau
Tel.: 07393 871300
Email: info@schotterwerk-kirchen.de

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Heiko Rahm
Gartenstraße 13/2
88400 Biberach an der Riss
Tel.: 07351 582 306
Email: rahm@hochschule-bc.de

Berechnungsgrundlagen:

- [1] DIN 4150-1: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 1: Vorermittlungen von Schwingungsgrößen (Juni 2001)
- [2] DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkung auf bauliche Anlagen (Dezember 2016).
- [3] Petersen, Werkle: Dynamik der Baukonstruktionen, Springer Vieweg, 2. Auflage, 2017
- [4] Studer, Laue, Koller: Bodendynamik, 3. Auflage, 2007
- [5] <https://www.ruspeckhofer.at/fachwissen/sprengerschuetterungen-2>
- [6] Rahm: SWK GmbH & Co. KG - Steinbruch Kirchen: Sprengerschütterungen vom 21.09.2020
- [7] Rahm: SWK GmbH & Co. KG - Steinbruch Fischersberg: Sprengerschütterungsprognose / WEA vom 02.06.2022
- [8] Prüfbericht für eine Typenprüfung 3108363-14-d Rev.1: Prüfung der Standsicherheit – Hybridturm T20, Windenergieanlagen Vestas V162-5.4/5.6/6.0MW, 169m Nabenhöhe, 12.01.2021
- [9] Prüfbericht für eine Typenprüfung 2839951-13-d: Prüfung der Standsicherheit – Stahlrohturm, Windenergieanlagen Vestas V150-4.0/4.2MW, MK3E, 123m Nabenhöhe, 06.03.2019
- [10] DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten



1.2 Vorhabenbeschreibung

Ausgangssituation

Die SWK Schotterwerk Kirchen GmbH & Co.KG, Munderkingen, betreibt südwestlich von Ehingen-Kirchen einen Steinbruch am Standort "Gelber Stein", in dem hochwertige Kalksteine (Massenkalke) gewonnen werden. Aus diesem Rohstoff werden Produkte für die Bauwirtschaft, die Industrie und die Landwirtschaft erzeugt. Die Produktion dient vorrangig der Versorgung des lokalen und regionalen Marktes. Rund 60 % des abgebauten Materials werden in der Umgebung von Ehingen und Munderkingen gebraucht. Weitere 20 % werden in der Region bis Ulm, Riedlingen, Münsingen und in Oberschwaben abgesetzt. Im bestehenden Steinbruch ist die Rohstoffgewinnung nur noch wenige Jahre möglich. Eine Erweiterung am "Gelben Stein" ist aufgrund einzuhaltender Schutzabstände zur Ortslage von Kirchen (im Nordosten) und zum Schloss Mochental (im Südwesten) nicht möglich.

Raumordnerische Beurteilung

Zur Sicherung des Betriebes und der regionalen Rohstoffversorgung ist die Erschließung eines neuen Steinbruchs erforderlich. Dieser soll am Fischersberg entstehen. Zugleich sind dort Aufbereitungsanlagen, die notwendigen Nebeneinrichtungen und ein Verwaltungs- und Sozialgebäude geplant.

Für das Vorhaben wurde gemäß § 18 Abs. 1 Satz 1 LplG i. V. m. § 1 Nr. 17 ROV ein Raumordnungsverfahren mit umfänglicher Variantenprüfung durchgeführt.

Die raumordnerische Beurteilung durch das Regierungspräsidium Tübingen wurde am 20. September 2022 positiv abgeschlossen. Der geplante Steinbruch Fischersberg ist mit den Erfordernissen der Raumordnung vereinbar und mit anderen raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen abgestimmt.

Rohstoffgewinnung

Die Gewinnung des Kalkgesteins ist am Fischersberg überwiegend innerhalb des Flurstücks 1442 auf der Gemarkung Untermarchtal vorgesehen. Der nordöstliche Teil des geplanten Steinbruchs liegt auf Gemarkung Ehingen-Kirchen, dort auf Teilen der Flurstücke 1141 und 1148. Der außerhalb des geplanten Steinbruchs vorgesehene Teil des Werksgeländes liegt auf dem Flurstück 1185 der Gemarkung Untermarchtal. Der geplante Steinbruch nimmt in seiner maximalen Ausdehnung 31,5 ha ein.

Der Abstand der Weißjuraabbaukante des Steinbruchs von der Grenze des östlich angrenzenden Windkraftvorranggebietes beträgt mindestens 10 m. Dort und an den weiteren Steinbruchrändern schließt sich an die Weißjuraabbaukante nach außen ein Schutzstreifen an. An diesen grenzt die Abraumböschung, an deren Oberkante sich ein kleiner Schutzwall anschließt. Daran schließen sich ein Weg, ein Zaun sowie ein



Sicht- und Immissionsschutzwall an. Die Gestaltung und Bepflanzung des Walls wird als Lebensraum europarechtlich geschützter Arten optimiert.

Der Aufschluss der Lagerstätte beginnt im Süden. Nach der vorlaufenden Schaffung eines Arbeitsbereiches und Erschließung des Tagebaus vom Werksgelände aus werden die Abbausohlen im südwestlichen Bereich entwickelt. Der Abbau wird dann in östlicher und nördlicher Richtung vorangetrieben. Auf diese Art wird eine Weitung des Tagebaus erfolgen. Oberboden und Abraum des ersten Abbauabschnittes werden zum bestehenden Steinbruch Kirchen transportiert und dort zur Rekultivierung verwandt.

Im Zuge der Gewinnung des Kalksteins werden lagerstättenabhängig Abbausohlen mit Mächtigkeiten von etwa 18 m angelegt. Die tiefste Abbausohle wird zunächst bei 516 m NHN erreicht. Wenn Grundwasserstandsdaten über längere Zeiträume vorliegen, die einen ausreichenden Abstand zur Grundwasseroberfläche belegen, ist das Abbauziel 514 m NHN. Im Norden des Steinbruchs beträgt die größte Erhebung des Urgeländes ca. 590 m NHN.

Das durch Sprengung gelöste Gestein wird mit Hilfe von Bagger und Radlader aufgenommen und mittels Muldenkipper zur Vorbrechanlage transportiert. Das vorgebrochene Gestein wird anschließend den Aufbereitungsanlagen mittels einer Förderbandanlage zugeführt.

Insgesamt werden ca. 17 Mio. t verwertbarer Kalkstein gewinnbar sein. Bei einer erwarteten Förderung von etwa ca. 550.000 t verwertbarem Kalkstein im Jahr resultiert ein voraussichtlicher Abbauzeitraum von etwa 30 Jahren. Die Fertigstellung der Rekultivierung erfordert einen zeitlichen Nachlauf von ca. 15 Jahren. Das Abbaukonzept gliedert den Abbau in drei Abschnitte mit einer Gewinnungszeit von jeweils etwa 10 Jahren.

Betriebszeiten

Die Rohstoffgewinnung und der Betrieb des Steinbruchs erfolgen in der Regel einschichtig. Beantragt wird für den Steinbruch eine Betriebszeit an Werktagen zwischen 6 und 22 Uhr.

Die Aufbereitungsanlagen werden im Bereich der Schotter- und Splitterzeugung in der Regel auch einschichtig betrieben, die Erzeugung der Industriekalke erfolgt regelmäßig zwei- bzw. dreischichtig, so dass im Bereich der Aufbereitungsanlagen eine Betriebszeit von 0 bis 24 Uhr werktags beantragt wird.

Da die Feinmahanlage Industriekalke und die Trocknungsanlage Industriekalke mannlos betrieben werden, wird für diesen Bereich der Aufbereitungsanlagen eine Betriebszeit von 0 bis 24 Uhr an sieben Tagen in der Woche beantragt.

1.3 Aufgabenstellung des vorliegenden Gutachtens

Durch die Gewinnungssprengungen im Großbohrloch-Sprengverfahren im zukünftigen Steinbruch „Fischersberg“ werden Erschütterungen emittiert, die sich im Untergrund ausbreiten.

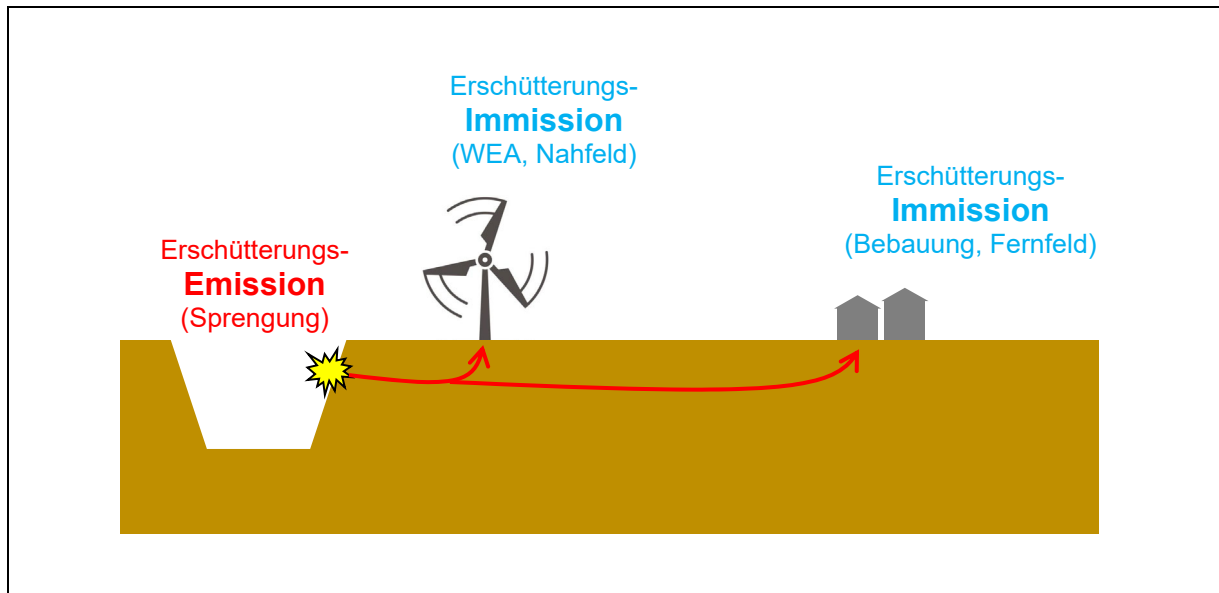


Bild 1.1: Windkraftvorrangfläche

Die hierbei entstehenden Erschütterungs-Immissionen sollen prognostiziert und bewertet werden. Hierbei wird zwischen Nahfeld (Abstand unter 50m zur Sprengstelle) und Fernfeld unterschieden.

In Abschnitt 2 des vorliegenden Gutachtens werden die Erschütterungs-Immissionen in den umliegenden Ortschaften berechnet und auf Basis von DIN4150 Teil 3 [2] bewertet.

Im Anschluss wird in Abschnitt 3 überprüft, ob die zu erwartenden Sprengerschütterungen Auswirkungen auf eventuell zukünftig erstellte Windenergieanlagen (WEA) auf dem östlich angrenzenden Windkraftvorranggebiet haben. Hierbei soll untersucht werden, welche Maßnahmen (einzuhaltende Abstände, maximale Sprengstoffmengen, ...) ggf. erforderlich werden, um sicherzustellen, dass es keine Einschränkungen für das Windkraftvorranggebiet durch Erschütterungsemissionen im Steinbruch gibt.



2 Immissionsprognose an der Nachbarbebauung im Fernfeld

2.1 Prognoseformeln

Zur Immissionsprognose werden die nachfolgend erläuterten Formeln verwendet. Grundlage für die anzuwendenden Prognoseformeln bildet die DIN 4150 Teil 1 [1] „Vorermittlung von Schwingungsgrößen“. Für die Immissionsprognose werden zwei unterschiedliche Grundgleichungen benutzt, die den Einfluss der Lademenge je Zündzeitstufe und die Immissionshöhe zur Entfernung zwischen Emissionsort (Sprenganlage) und Immissionsort (Bauwerk) in Beziehung setzen und die mit der DIN 4150 Teil 1 [1] korrespondieren. Sie beinhalten seit vielen Jahren unseren Stand der Technik.

Koch`sche Gleichung

Diese Formel wurde von Professor Koch beim Bau der Biggetalsperre - damals wurden später überflutete Häuser als Versuchsobjekte benutzt - aus praktischen Messreihen entwickelt und stellt heute immer noch den Stand der Technik dar:

$$v_i = K_{\text{Koch}} \cdot L^{0,5} \cdot R^{-1}$$

Darin bedeuten:

v_i = maximale Schwinggeschwindigkeit [mm/s]

L = Höchstlademenge/Zündzeitstufe [kg]

R = kürzeste Entfernung Sprengstelle - Immissionsort [m]

K_{Koch} = Gebirgsbeiwert

Die Koch`sche Gleichung bietet für den Nahbereich eine gute Prognosesicherheit. Der Gebirgsbeiwert K_{Koch} wurde auf Basis eigener Messungen im Fernfeld des benachbarten Steinbruchs „Gelber Stein“ [6] mit 25 angesetzt.

Formel nach BGR

1986 wurde das Resultat eines Forschungsauftrages in den Nobelheften veröffentlicht, das federführend von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bearbeitet wurde und die Vorermittlung von Sprengerschütterungsemissionen zum Thema hatte. Die Autoren Dr. Lüdeling und Dr. Hinzen veröffentlichten folgende Formel für Sedimentgesteine:

$$v_i = K_{\text{BGR}} \cdot L^{0,6} \cdot R^{-1,5}$$

v_i , L und R haben die gleiche Bedeutung wie in der Koch`schen Gleichung. Der Gebirgsbeiwert K_{BGR} wurde auf Basis eigener Messungen im Fernfeld des benachbarten Steinbruchs „Gelber Stein“ [6] mit 280 angesetzt.



Mit Hilfe von Erschütterungsmessungen im anstehenden und zu beurteilenden Festgestein kann der Gebirgsbeiwert K_{BGR} in Abhängigkeit von L und R für jede Situation individuell errechnet werden. Die BGR-Formel hat sich besonders für den Fernbereich als gute Möglichkeit zur Vorabschätzung bewährt. Im Nahbereich unter 100m ist die Verwendung der Koch'schen Formel zu bevorzugen. Beide Berechnungsarten sind bei den Prognosen im Fernfeld zum Vergleich untereinander mit aufgeführt.

2.2 Entfernungen vom Steinbruch „Fischersberg“

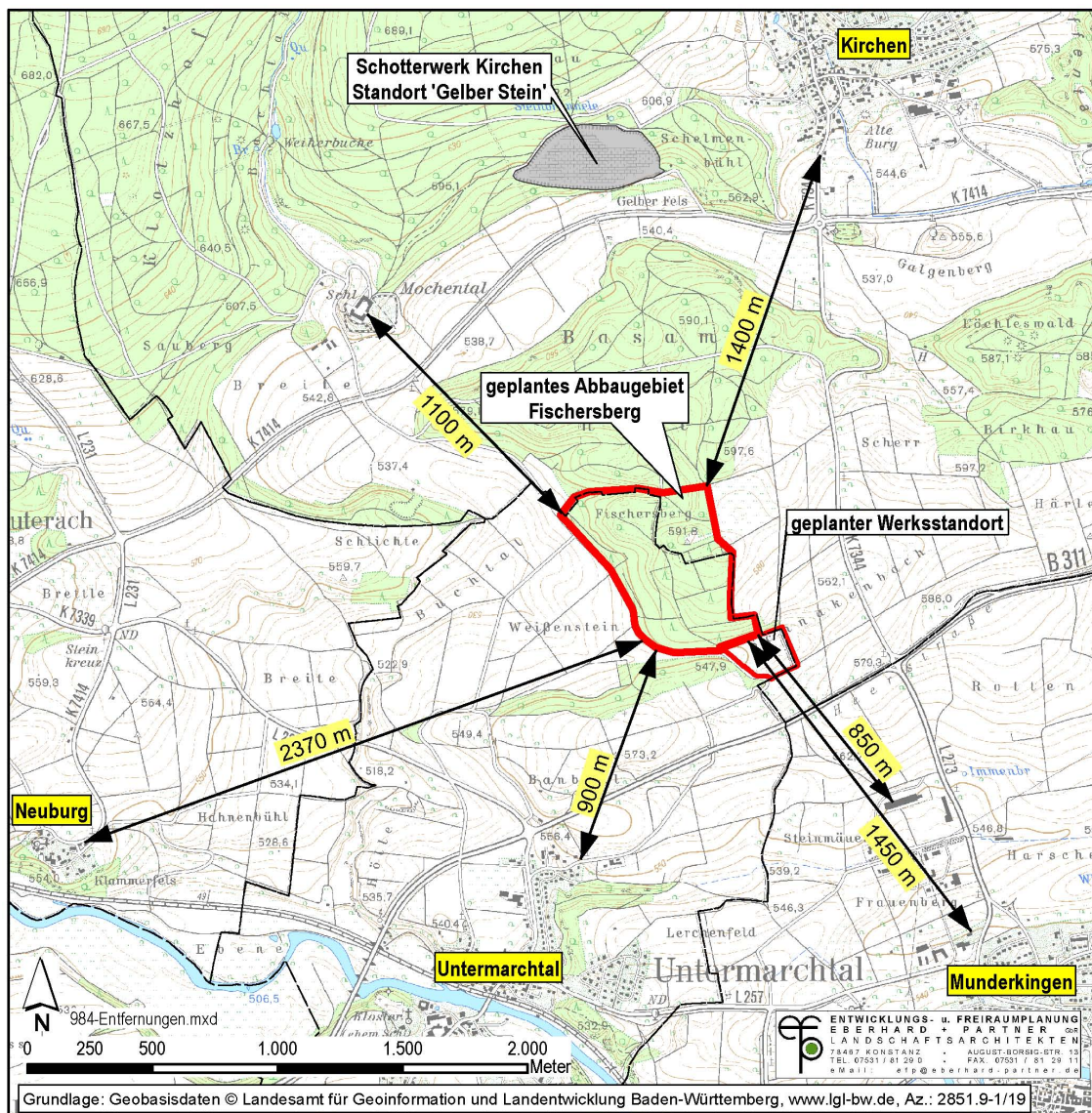


Bild 2.1: Entfernungen zur Nachbarbebauung



In Tabelle 2.1 sind die Entfernungen der dem Steinbruch „Fischersberg“ nächst gelegenen, baulichen Anlagen zusammengestellt. Diese wurden aus [Bild 2.1] entnommen.

	Entfernung R [m]
A: Schloss Mochental	1100
B: Kirchen	1400
C: Munderkingen	1450
D: Untermarchtal	900
E: Neuburg	2370
F: Montagehalle Engst	850

Tabelle 2.1: Entfernungen vom Steinbruch „Fischersberg“

2.3 Anhaltswerte nach DIN4150

In [Bild 2.2] ist ein Auszug aus DIN4150 Teil 3 [2] mit den Anhaltswerten der zulässigen Schwinggeschwindigkeiten zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen auf Gebäude dargestellt.

In Tabelle 2.2 sind die maximalen Schwinggeschwindigkeiten nach DIN4150 Teil 3 [2] für die nächst gelegenen, baulichen Anlagen zusammengestellt. Da jeweils die minimalen Werte verwendet werden, können die angegebenen Anhaltswerte unabhängig von den zugehörigen Frequenzen angesetzt werden.

	Gebäudeart	Anhaltswert $v_{i,max}$ [mm/s]
A: Schloss Mochental	Kulturdenkmal (Zeile 3)	3
B: Kirchen	Wohngebäude (Zeile 2)	5
C: Munderkingen	Wohngebäude (Zeile 2)	5
D: Untermarchtal	Wohngebäude (Zeile 2)	5
E: Neuburg	Wohngebäude (Zeile 2)	5
F: Montagehalle Engst	Industriebauwerk (Zeile 1)	20

Tabelle 2.2: Anhaltswerte nach DIN4150 Teil 3 [2]



Tabelle 1 — Anhaltswerte für $v_{i, \max}$ zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen auf Gebäude

-	Gebäudeart	Anhaltswerte für $v_{i, \max}$ in mm/s				
		Fundament, alle Richtungen, $i = x, y, z$ Frequenzen			Oberste Deckenebene, horizontal, $i = x, y$	Decken, vertikal, $i = z$
		1 Hz bis 10 Hz	10 Hz bis 50 Hz	50 Hz bis 100 Hz ^a	alle Frequenzen	alle Frequenzen
Spalte Zeile	1	2	3	4	5	6
1	Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	20	20 bis 40	40 bis 50	40	20
2	Wohngebäude und in ihrer Konstruktion und/oder Nutzung gleichartige Bauten	5	5 bis 15	15 bis 20	15	20
3	Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und Zeile 2 entsprechen <u>und</u> besonders erhaltenswert (z. B. unter Denkmalschutz stehend) sind	3	3 bis 8	8 bis 10	8	20 ^b
ANMERKUNG Auch bei Einhaltung der Anhaltswerte nach Zeile 1, Spalten 2 bis 5 können leichte Schäden nicht ausgeschlossen werden.						
a Bei Frequenzen über 100 Hz dürfen mindestens die Anhaltswerte für 100 Hz angesetzt werden.						
b Unterabschnitt 5.1.2 Absatz 2 ist zu beachten.						

Bild 2.2: Auszug DIN4150 Teil 3 [2]



2.4 Strengtechnische Daten

In Tabelle 2.3 sind die strengtechnischen Daten, welche diesem Gutachten zugrunde liegen, zusammengestellt:

Wandhöhe	2,00m bis 30,00m
Bohrlochdurchmesser	65mm bis 130mm
Ladungsmenge je Zündstufe	bis 120kg
Zündung	25ms, elektrischer Kurzzeitzünder
spezifischer Sprengstoffverbrauch	0,1kg bis 0,5kg pro m ³ Fels
Bohrlochneigung	ca. 70° bis 90°
Bohrlochtiefe	2,00m bis 30,00m
Bohrlochvorgabe	1,00m bis 5,00m
Bohrlochabstand	1,00m bis 5,00m
Reihenzahl	1 bis 3
Endbesatz	1,00m bis 4,00m

Tabelle 2.3: Strengtechnische Daten

2.5 Prognose der Sprengerschütterungen im Fernfeld

Die Berechnung der in Tabelle 2.4 zusammengestellten Erschütterungsprognosen erfolgt mit den Formeln aus Abschnitt 2.1 unter Ansatz der maximalen Ladungsmenge ($L=120\text{kg}$) und der messtechnisch ermittelten Gebirgsbeiwerte.

	Koch'sche Gleichung ($L=120\text{kg}$; $K_{\text{Koch}}=25$) v_i [mm/s]	BGR-Formel ($L=120\text{kg}$; $K_{\text{BGR}}=280$) v_i [mm/s]
A: Schloss Mochental	0,25	0,14
B: Kirchen	0,20	0,09
C: Munderkingen	0,19	0,09
D: Untermarchtal	0,30	0,18
E: Neuburg	0,12	0,04
F: Montagehalle Engst	0,32	0,20

Tabelle 2.4: Prognose der Sprengerschütterungen im Fernfeld



Erwartungsgemäß liegen die Werte nach der Koch'schen Gleichung im hier betrachteten Fernbereich über den nach der BGR-Formel ermittelten Werten.

In Tabelle 2.5 wird die Erschütterungsprognose mit den Anhaltswerten nach DIN4150 Teil 3 (aus Tabelle 2.2) verglichen. Es zeigt sich, dass die prognostizierten Erschütterungen die Anhaltswerte nach DIN4150 deutlich unterschreiten. Die zulässigen Werte werden am Schloss Mochental lediglich zu 8,3% „ausgenutzt“, d.h. die zulässigen Werte werden mit dem Faktor 12 unterschritten.

	Prognose v_i [mm/s]	zulässig nach [2] $v_{i,max}$ [mm/s]	Ausnutzungsgrad $v_i/v_{i,max}$ [%]
A: Schloss Mochental	0,25	3	8,3%
B: Kirchen	0,20	5	3,9%
C: Munderkingen	0,19	5	3,8%
D: Untermarchtal	0,30	5	6,1%
E: Neuburg	0,12	5	2,3%
F: Montagehalle Engst	0,32	20	1,6%

Tabelle 2.5: Vergleich Prognose / zulässige Werte

2.6 Fazit der Immissionsprognose im Fernfeld

Nach den ausgeführten Berechnungen auf Grundlage der DIN4150 Teil 3 [2] und den Erschütterungsmessungen am benachbarten Steinbruch „Gelber Stein“ sind Schäden an den baulichen Anlagen, ausgelöst durch Gewinnungssprengungen im Großbohrloch-Sprengverfahren im Steinbruch „Fischersberg“, auszuschließen.

Nach Betriebsaufnahme sollten die prognostizierten Sprengerschütterungen durch eine Erschütterungsmessung kontrolliert und verifiziert werden.

3 Immissionsprognose an WEA im Nahfeld

3.1 Entfernung der WEA vom Steinbruch „Fischersberg“

Östlich des Steinbruchs „Fischersberg“ liegen Windkraftvorrangflächen [Bild 3.1], auf denen zu einem späteren Zeitpunkt Windenergieanlagen (WEA) gebaut werden könnten. Erschütterungsemissionen im Steinbruch dürfen hierbei die Nutzung der Windkraftvorrangflächen nicht einschränken.

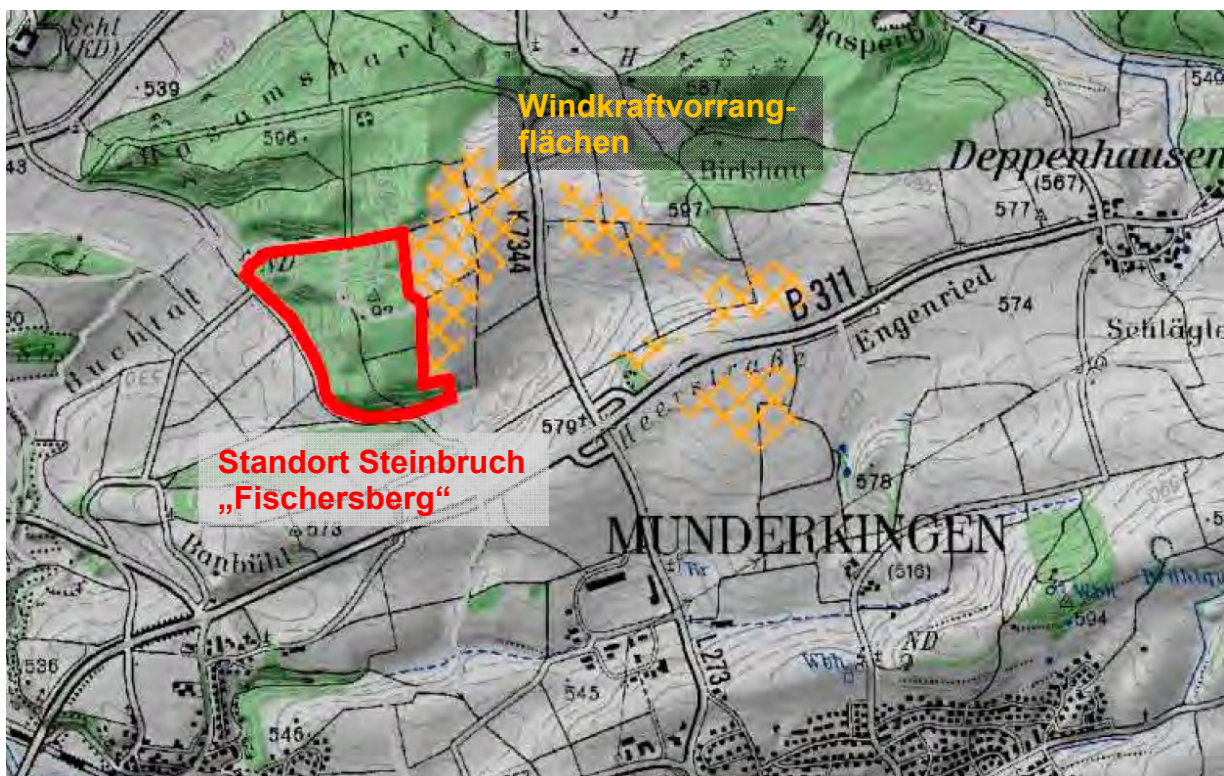


Bild 3.1: Lage der Windkraftvorrangflächen

Zur Art und zu möglichen Standorten zukünftiger WEA wurden seitens des LRA folgende Vorgaben formuliert:

- Auf der gesamten Vorrangfläche für Windkraftanlagen kann ein Windrad der neuesten Bauart entstehen. Konkret soll die Untersuchung an folgendem Anlagentyp durchgeführt werden: Vestas Wind Systems A/S
V172-7.2MW (175m Nabenhöhe, 172m Rotor)
- Das Fundament liegt vollständig innerhalb des Vorranggebietes, allerdings kann der Rotor darüber hinausragen (Rotor-Out-Lösung).

Die seitens des LRA benannte Anlage kann nach heutigem Stand nur als „Platzhalter“ verstanden werden. Auf der einen Seite ist dieser Anlagentyp so neu,

dass noch keine geprüften Unterlagen verfügbar sind. Andererseits befinden sich WEA in einem ständigen Entwicklungsprozess, d.h. in den nächsten Jahren werden sich Nabhöhen und Fundamentdurchmesser ebenfalls weiterentwickeln.

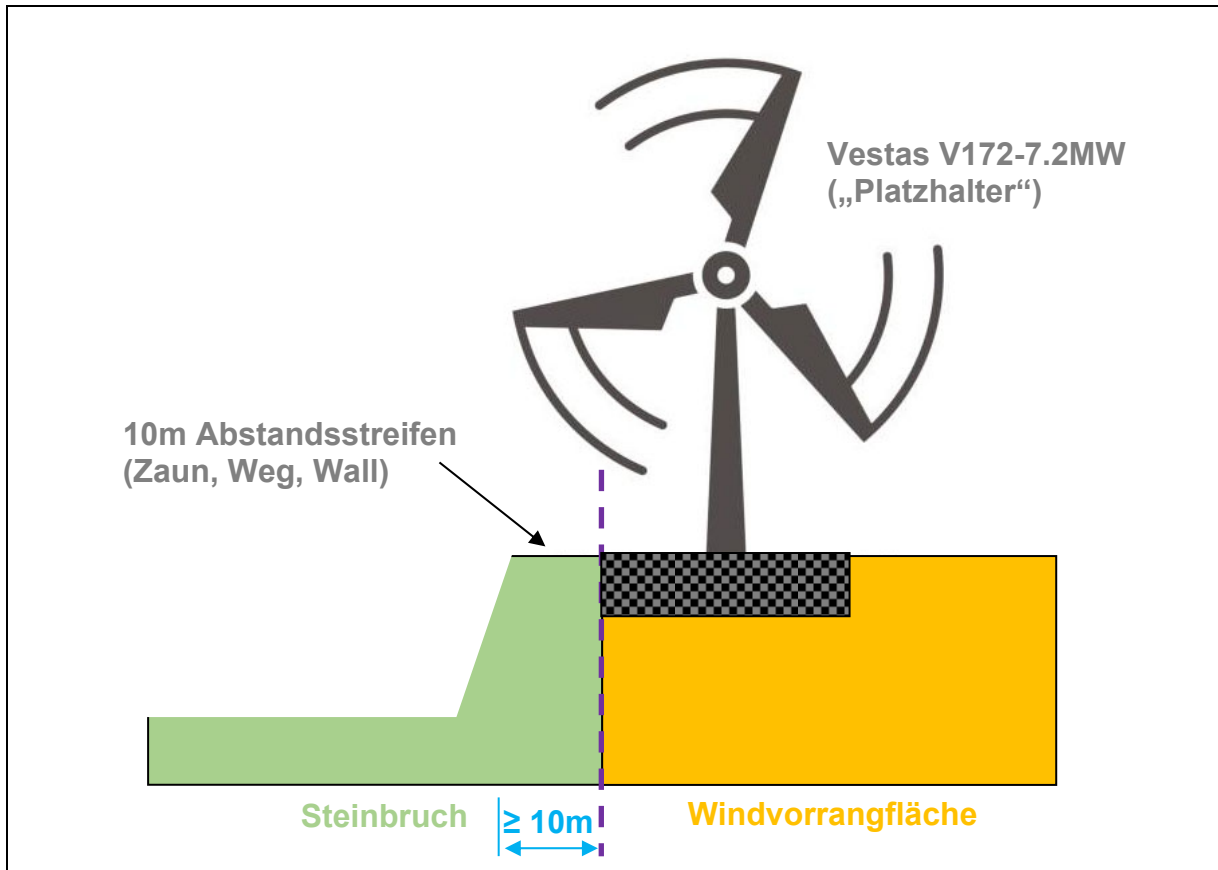


Bild 3.2: Minimaler Abstand WEA – Steinbruch „Fischersberg“

Unterstellt man, dass das Fundament einer zukünftig errichteten WEA direkt auf der Grenze der Windvorrangfläche liegt, so entspricht der Abstand der Böschungskante zur Fundamentaßenkante der WEA dem vorgesehenen 10m breiten Abstandsstreifen am Rand des Steinbruchs (für Zaun, Weg und Sichtschutzwall). Durch die Wahl der Fundamentaßenkante als Bezugspunkt für die Erschütterungsprognose spielt der Fundamentdurchmesser selbst keine Rolle.

3.2 Sprengtechnische Daten

In Tabelle 2.3 sind die sprengtechnischen Daten, welche diesem Gutachten zugrunde liegen, zusammengestellt. Im Regelbetrieb wird von einer Ladungsmenge von 120kg je Zündzeitstufe ausgegangen.

3.3 Prognose der Sprengerschütterungen im Nahfeld

Für die Immissionsprognose wird die Koch'sche Gleichung benutzt (vgl. Abschnitt 2.1). Der Gebirgsbeiwert K_{Koch} wird im Nahfeld konservativ zu 80 (Kalkstein) angenommen. Durch die in [7] dokumentierten Erschütterungsmessungen im Steinbruch „Gelber Fels“ wird bestätigt, dass diese Annahme auf der Sicheren Seite liegt, d.h. die tatsächlichen Erschütterungen im Steinbruch „Fischersberg“ werden durch die rechnerische Prognose tendenziell überschätzt.

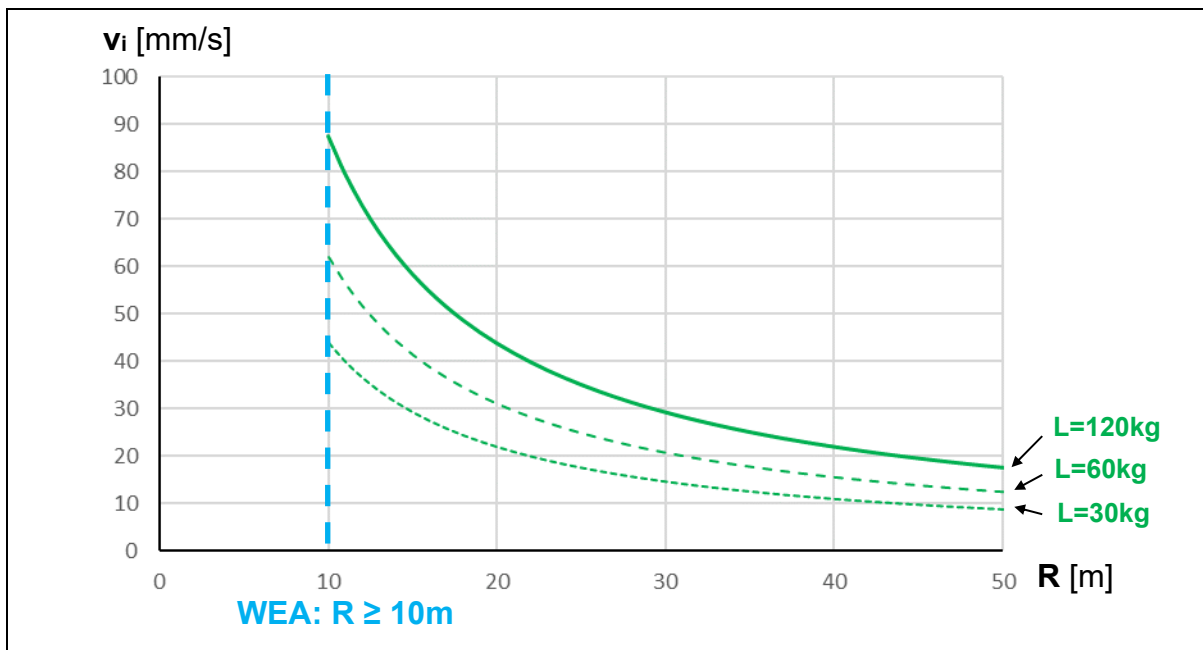


Bild 3.3: Prognose nach Koch im Nahfeld (maximale Schwinggeschwindigkeiten)

Die nach Koch berechnete maximale Schwinggeschwindigkeit v_i beinhaltet keine Informationen zum zeitlichen Verlauf der Erschütterungsgröße.

3.4 Vereinfachte Bewertung der WEA als Industriebauwerk

In erster Näherung kann eine WEA als Industriebauwerk betrachtet werden, wonach sich bei einer Bewertung nach DIN4150 Teil 3 [2] eine frequenzunabhängig, zulässige Schwinggeschwindigkeit von 20mm/s ergibt (siehe hierzu [Bild 2.2]). Sollte eine zukünftige WEA weiter als 50m vom Sprengort entfernt stehen, so wird die zulässige Schwinggeschwindigkeit von 20mm/s selbst bei einer maximalen Ladungsmenge je Zündzeitstufe von $L=120\text{kg}$ unterschritten [Bild 3.3].



Sollte zukünftig eine WEA näher als 50m vom Sprengort entfernt stehen, so besteht die Möglichkeit durch eine Minderung der Ladungsmengen die Sprengerschütterungen gezielt zu reduzieren.

Bei dieser vereinfachten Nachweisführung ist zu beachten, dass eine Bewertung einer zukünftigen WEA als Industriebauwerk im Sinne der DIN4150 Teil 3 [2] sehr weit auf der Sicherer Seite liegt, da die speziellen dynamischen Eigenschaften einer WEA nicht berücksichtigt werden.

Die seitens des LRA spezifizierte WEA unterscheidet sich deutlich von üblichen Industriebauten:

- Die WEA besitzt einen monolithischen Fundamentkörper und ist nicht auf filigrane Einzel- und Streifenfundamente gegründet. Somit können bei einer WEA beispielsweise keine Relativbewegungen zwischen einzelnen Gründungskörpern entstehen.
- Durch den charakteristischen Aufbau einer WEA, mit schlankem Mast mit großer Kopfmasse, besitzt diese sehr niedrige Eigenfrequenzen (etwa 0,1 bis 0,2Hz), die erheblich unterhalb der Eigenfrequenzen üblicher Industriebauten (etwa 5 bis 20Hz) liegen.
- Eine WEA ist während ihres Betriebs ständig dynamischen Belastungen ausgesetzt (Böigkeit des Windes, Unwucht des Rotors, Vorbeistreichen der Rotorblätter am Mast, ...) und wird auch entsprechend konstruiert (Vermeidung von geometrischen Kerben, Nachweis der Materialermüdung, aktive und passive Dämpfungssysteme). Im Gegensatz dazu sind Industriebauten i.d.R. nur für statische Lasten bemessen und reagieren deutlich sensibler auf „unplanmäßige“ Erschütterungen.

Da einerseits charakteristische Impulsformen (gemessene $v(t)$ -Verläufe [7] im Steinbruch „Gelber Stein“, die aufgrund vergleichbarer Untergrundverhältnisse auf den Standort „Fischersberg“ übertragbar erscheinen) als auch detaillierte Angaben des LRA zu der angedachten WEA vorliegen, ist es möglich, die Sprengerschütterungen anhand von Antwortspektren genauer zu bewerten.

Antwortspektren werden zur Erdbebenbemessung von Bauwerken verwendet. Sie stellen die Reaktion des Bauwerks dar, die bei einer Erregung mit einer seiner Eigenfrequenzen zu erwarten ist.

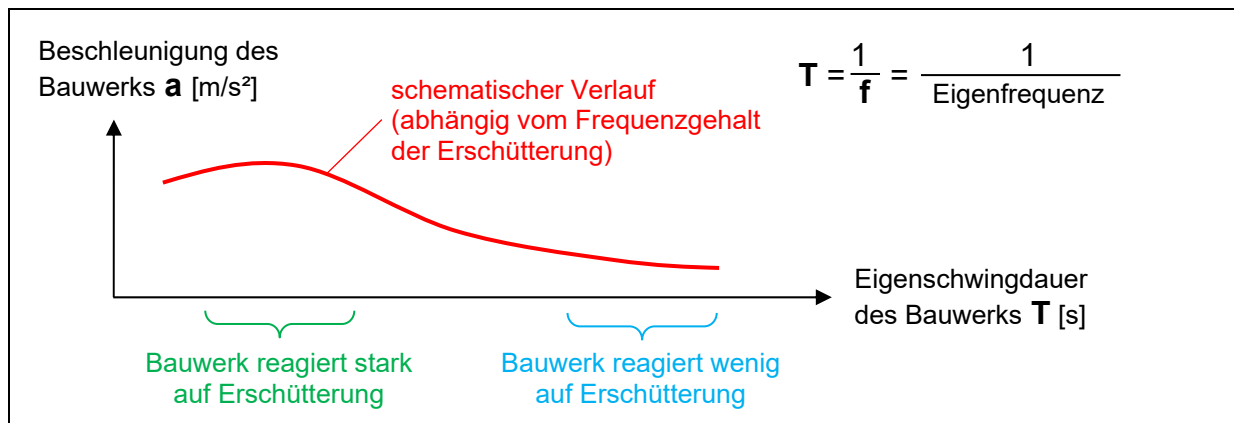


Bild 3.4: Schemadarstellung Antwortspektrum

Durch dieses Vorgehen kann die Aussagequalität gegenüber der Bewertung nach DIN4150 [2], bei der weder die dynamischen Bauwerkseigenschaften noch der Frequenzgehalt der Erschütterung eingehen, deutlich verbessert werden.

3.5 Auswertung der Erschütterungsmessungen

In Zuge der in [7] dokumentierten Erschütterungsmessungen im Nahfeld (Abstand zur Sprengstelle < 50 m) zweier Gewinnungssprengungen sind nun charakteristische $v(t)$ -Verläufe bekannt [Bild 3.5].

Die Beschleunigung $a(t)$ ist die Ableitung der Geschwindigkeit $v(t)$ nach der Zeit t :

$$a(t) = dv(t)/dt$$

Bei den dargestellten Verläufen kann man näherungsweise eine harmonische Funktion mit einer Schwingdauer von $T=0,2s$ erkennen. Somit würden sich (ebenfalls näherungsweise) die maximalen Beschleunigungsamplituden um den Faktor 10π ($=2\pi/T$) von den maximale Schwinggeschwindigkeiten unterscheiden:

$$a_{\max} \approx 10\pi \cdot v_i$$

Auf eine genauere Ermittlung wird an dieser Stelle verzichtet. Um die Größenordnung der zu erwartenden Beschleunigungen im Sinne einer Prognose abzuschätzen erscheint das Vorgehen ausreichend genau.

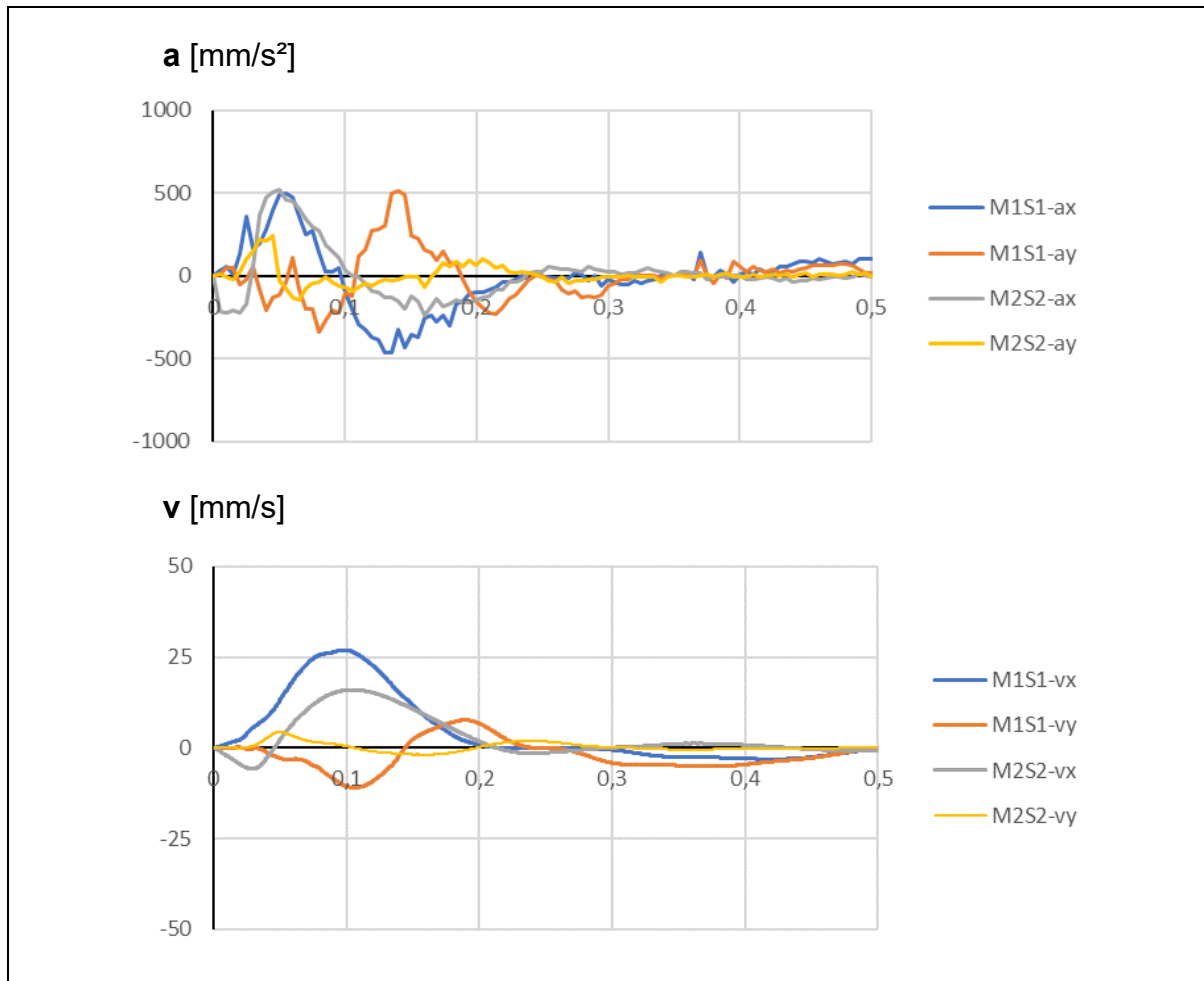


Bild 3.5: charakteristische $a(t)$ - und $v(t)$ -Verläufe

Neben der maximalen Beschleunigung spielt der Frequenzgehalt des $a(t)$ -Verlaufs aus baodynamischer Sicht eine ganz entscheidende Rolle. Wenn Erschütterungen auf eine elastische Struktur als Basisanregung einwirken, dann hängt die Antwort der Struktur von deren Eigenfrequenz ab.

In Anlehnung an die Erdbebennorm EC8 [10] wird aus den $a(t)$ -Verläufen elastische Antwortspektren ermittelt. Diese beschreiben die Antwort (Beschleunigung) eines elastisch sich verformenden Bauwerks auf ein Beben. Es beschreibt somit die Einwirkung auf Tragwerke, die bei Erdbebeneinwirkung im linear-elastischen Bereich verbleiben, ohne dass Energie anders als durch viskose Dämpfung dissipiert wird. Auf eine mögliche Reduzierung der eingetragenen Energie durch hysteretische Energiedissipation im Bauwerk wird an dieser Stelle im Sinne einer konservativen Abschätzung ebenfalls verzichtet.



Im Folgenden werden die gemessenen $a(t)$ -Verläufe aus [Bild 3.5] auf die maximale Bodenbeschleunigung ($a_{\max} = 0,55\text{m/s}^2$ bei $R=10\text{m}$ gemäß [Bild 3.6]) skaliert und für Eigenfrequenzen zwischen $0,1\text{Hz}$ und 10Hz untersucht. Die sich hieraus ergebenden elastischen Antwortspektren sind in [Bild 3.7] vergleichend dargestellt.

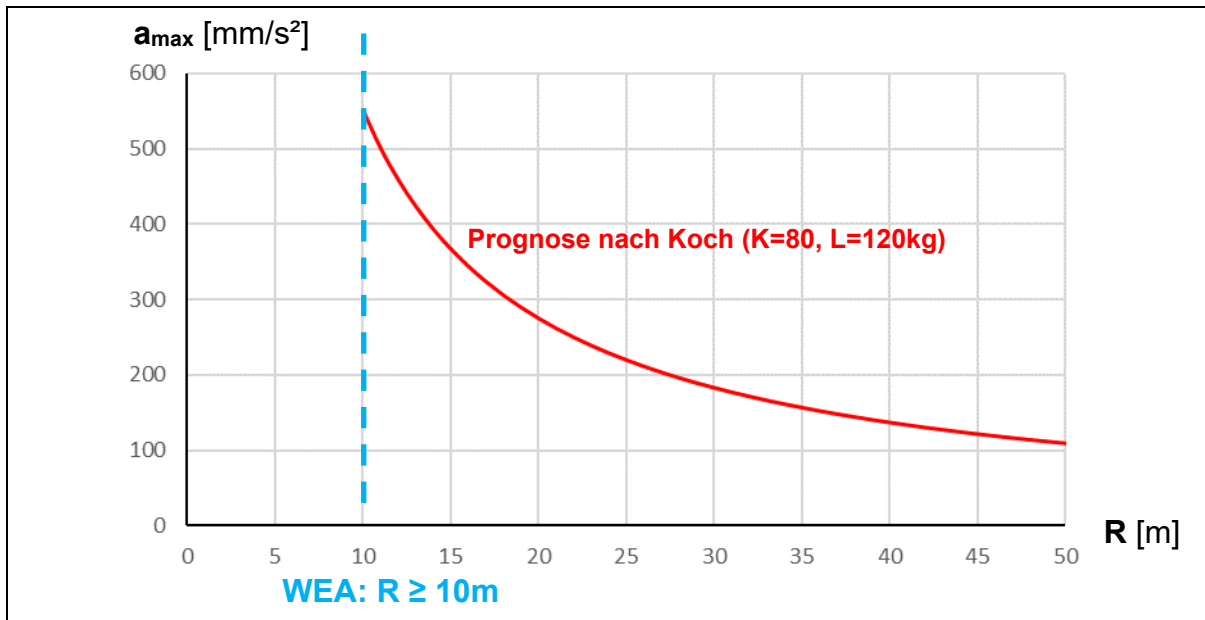


Bild 3.6: Prognose nach Koch (maximale Beschleunigungen)

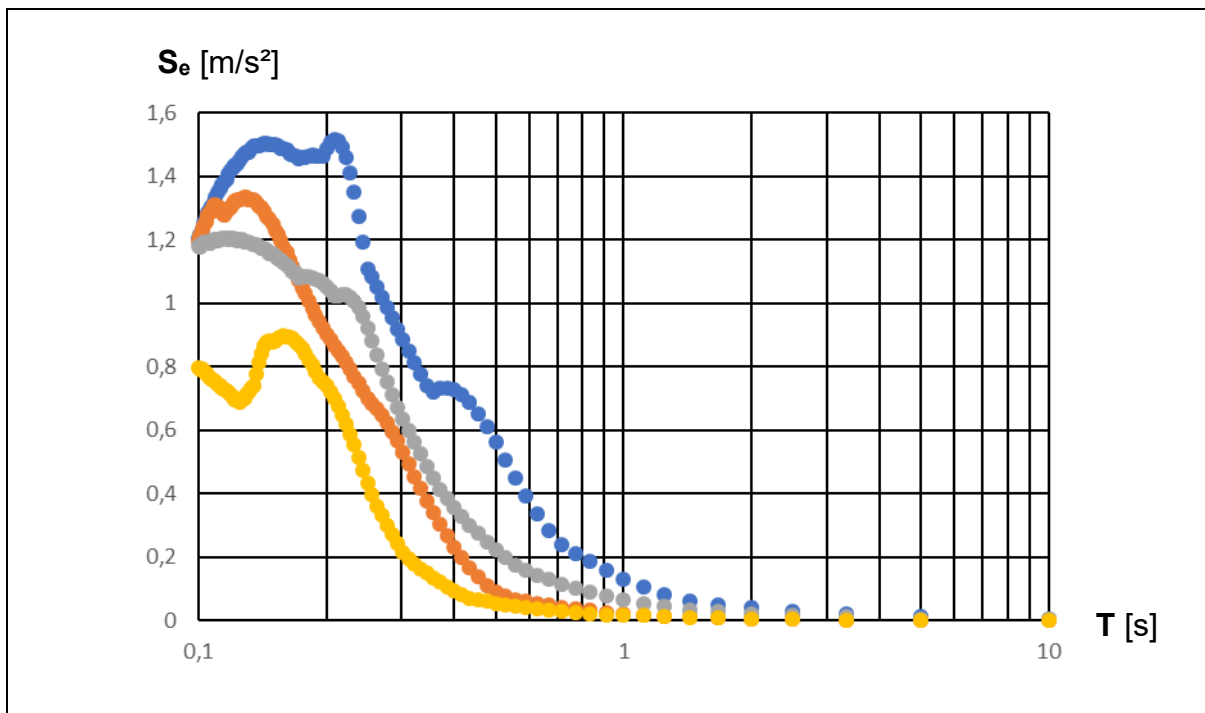


Bild 3.7: Elastische Antwortspektren (gemäß [Bild 3.6 skaliert])

Es zeigt sich, dass Tragwerke mit kleinen Eigenschwingdauern (und somit hohen Eigenfrequenzen) besonders stark auf die Sprengerschütterungen reagieren. Tragwerke mit großen Eigenschwingdauern reagieren kaum auf die Erschütterungen. Dies ist anschaulich in den großen Massenträgheit und der geringen Steifigkeit begründet – der einwirkende Impuls ist zu kurz, um das Tragwerk nennenswert in Bewegung zu versetzen. Aus diesem Grund nähern sich die Antwortspektren für große Eigenschwingdauern T asymptotisch dem Wert Null.

3.6 Bewertung der WEA

3.6.1 Baudynamische Eigenschaften der WEA

Die hier betrachteten Windkraftanlagen der neuesten Bauart (wie die exemplarisch genannte Vestas V172-7.2MW) besitzen bauartbedingt eine sehr niedrige erste Eigenfrequenz. Diese variiert, abhängig von der verwendeten Turmbauart (Stahlrohrbauweise oder Hybridbauweise) und den Gründungsverhältnissen, in der Regel in einem Bereich zwischen 0,1Hz und 0,2Hz, was Eigenschwingdauern von 10s bzw. 5s entspricht [8; 9].

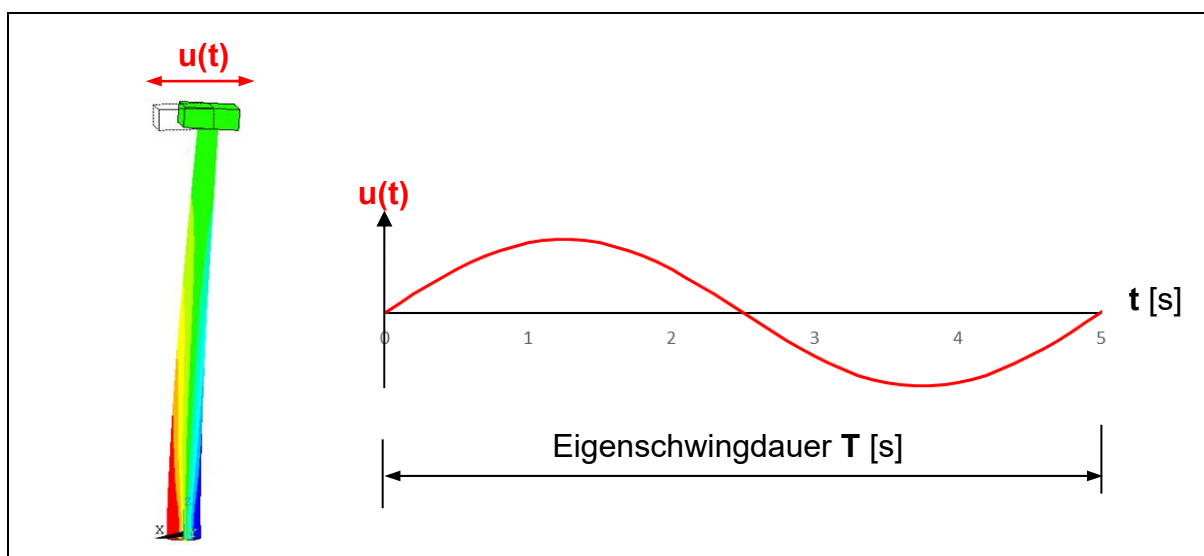


Bild 3.8: Schemadarstellung: Erste Eigenform und Eigenschwingdauer ($f_1=0,2\text{Hz}$)

Diese tiefen Eigenfrequenzen werden von den Herstellern bewusst so gewählt, damit der Mast nicht durch die Drehung des Rotors und durch das periodische Vorbeistreichen der Blätter am Mast in Resonanz versetzt wird.

Im Vergleich zur Dauer des Erschütterungsimpulses (vergleiche [Bild 3.5]) kann festgehalten werden, dass dieser etwa um den Faktor 25 bis 100 kürzer ist als die Eigenschwingdauer des Mastes. Die sehr schnell veränderlichen Einwirkungen (Erschütterungen) setzen sich weitgehend mit der Massenkraft (Massenträgheit der WEA) ins Gleichgewicht, die Verformungen (z.B. Bewegungen des Maschinenhauses) und die in der Struktur entstehenden Kräfte bleiben klein.

Man spricht von einer sogenannten „Tiefabstimmung“. Dieses Verhalten macht man sich bei der passiven Schwingungsisolierung zunutze, um beispielsweise ein empfindliches Gerät von den Erschütterungen der Umgebung zu entkoppeln.

Bei einer WEA ist dieses baulastdynamisch sehr günstige Verhalten bauartbedingt und liegt somit immer vor. Bei einer zukünftigen Entwicklung hin zu noch größeren und höheren Anlagen werden die Eigenfrequenzen tendenziell weiter sinken, was dann gleichzeitig deren Erschütterungs-Unempfindlichkeit noch weiter verbessert.

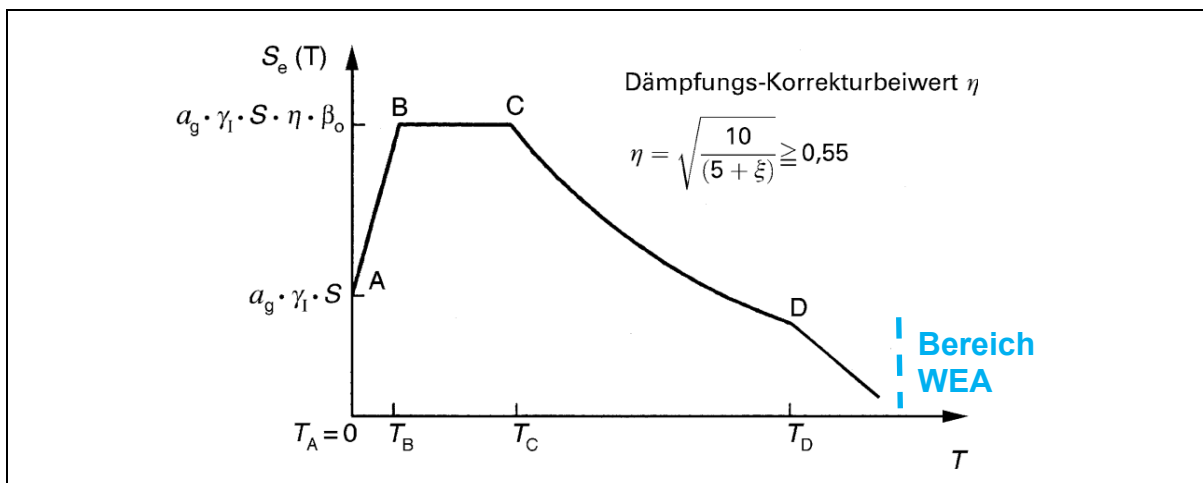


Bild 3.9: Elastisches Antwortspektrum [10]

Somit befindet sich eine solche WEA neuester Bauart auch im Erdbeben-Antwortspektrum weit auf der rechten Seite [Bild 3.9]. Sowohl Erdbeben- also auch Sprengerschütterungen können die WEA kaum zu Schwingungen anregen.

Diese „Erschütterungs-Unempfindlichkeit“ zeigt sich konkret beim Erdbebennachweis der WEA. Im Rahmen der Typenprüfung des Hybridturms T20 [8] wird in Bezug auf den Erdbebennachweis einer vergleichbaren Anlage mit 169m Nabenhöhe festgestellt:

„Einwirkungen aus Erdbeben sind (...) auf Basis der DIN EN 1998-1/10/ für alle Erdbebenzonen sowie Baugrund- und Untergrundklassen in Deutschland abgedeckt.“

Es kann also unterstellt werden, dass aktuelle wie auch in Zukunft entwickelte Anlagen sehr wahrscheinlich den Erdbebennachweis für Erdbebenzone 3 gemäß Typenberechnung automatisch erfüllen werden. Einschränkungen in der Typenberechnung bezüglich der möglichen Erdbebenzonen innerhalb Deutschlands würden die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Anlage beeinträchtigen und wären somit nicht im Sinne der Hersteller. Ungeachtet dessen muss eine WEA auf der hier betrachteten Vorrangfläche Windkraft stets mindestens die Anforderungen der Erdbebenzone 1 erfüllen, in der sich die Gemarkung Untermarchtal befindet.

3.6.2 Vergleich der Antwortspektren mit dem Erdbebennachweis

Die elastischen Antwortspektren nach [10], für die die WEA entsprechend Typenberechnung nachgewiesen ist, soll mit den Antwortspektren der Sprengerschütterungen verglichen werden. Hierzu werden exemplarisch folgende Eingangsparmeter, Baugrund- und Untergrundklassen gewählt:

- Bemessungswert der Bodenbeschleunigung: $a_g = 0,8\text{m/s}^2$ (Erdbebenzone 3)
- Bedeutungsbeiwert: $\gamma_I = 1,0$
- Dämpfungs-Korrekturbeiwert: $\eta = 1,41$ (ohne Dämpfung)
- Verstärkungswert der Spektralbeschleunigung: $\beta_0 = 2,5$
- Baugrund- und geologische Untergrundklasse: B-R ($S=1,25$)

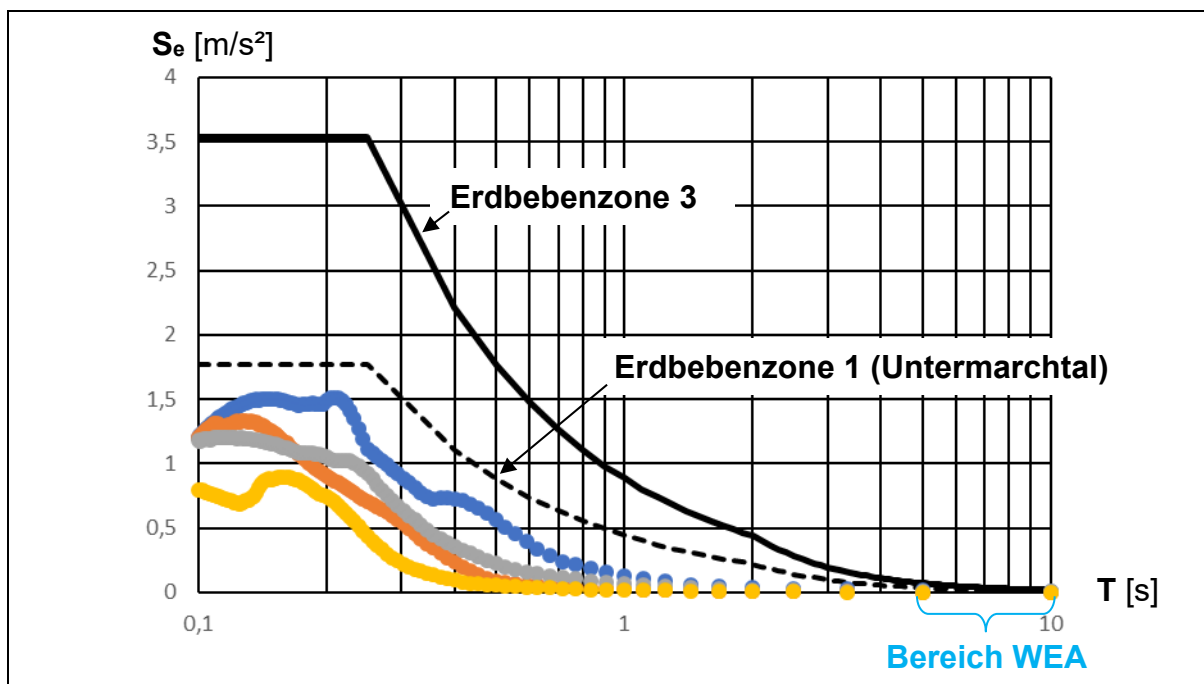


Bild 3.10: Vergleich Antwortspektren (Sprengerschütterung, Erdbeben)



Die elastischen Antwortspektren der Sprengerschütterungen liegt innerhalb des elastischen Antwortspektrums für Erdbebenzone 1, in der sich auch der Steinbruch „Fischersberg“ (Gemarkung Untermarchtal) sowie die Windvorrangfläche befindet. Die zukünftig zu errichtende WEA erfüllt also mindestens die Anforderungen für Erdbebenzone 1 (aktuelle WEA erfüllen gemäß Typenberechnung darüber hinaus sogar die Anforderungen für Erdbebenzone 3).

Somit kann davon ausgegangen werden, dass auch der Nachweis für Sprengerschütterungen (mit dem minimal möglichen Abstand von $R=10\text{m}$ zwischen Sprengstelle und Fundamentaußenkante und einer maximalen Ladungsmenge je Zündstufe von 120kg) automatisch erfüllt ist.

3.7 Fazit der Immissionsprognose im Nahfeld

Nach den ausgeführten Berechnungen und dem Vergleich der Antwortspektren mit dem Erdbebennachweis können Beeinträchtigungen für zukünftige WEA innerhalb des Vorranggebiets Windkraft, ausgelöst durch Gewinnungssprengungen im Großbohrloch-Sprengverfahren im Steinbruch „Fischersberg“, ausgeschlossen werden. Es bestehen keine Einschränkungen für das Vorranggebiet Windkraft durch Erschütterungsemissionen im Steinbruch.

Nach Bekanntgabe des genauen Standorts und des Anlagentyps der eventuell zukünftig zu errichtenden WEA müssen die prognostizierten Sprengerschütterungen durch Erschütterungsmessungen kontrolliert und verifiziert werden, um so bis zur Inbetriebnahme der WEA auch ggf. strengere Erschütterungsanforderungen (als die in diesem Gutachten angenommenen) zu erfüllen.

Geeignete Maßnahmen, um die Erschütterungsimmission im Bedarfsfall zu reduzieren, könnten beispielsweise sein:

- Reduktion der Ladungsmenge je Zündstufe
- Einhalten von Schutzradien nach dem Bau der WEA
- Optimierung der Anzahl und der Zündzeitpunkte der Zündstufen

Sollte im Nahbereich des Steinbruchs eine WEA errichtet werden, so wird empfohlen, bei Sprengarbeiten im Nahfeld (Abstand zur Sprengstelle $< 50\text{ m}$) die Sprengerschütterungen während des Betriebs der WEA zu überwachen.



4 Zusammenfassung der Erschütterungsprognosen

- a) Der Gebirgsbeiwert K für die Erschütterungsprognose nach Koch wurde im Nahfeld der Literatur entnommen und durch Messung im Steinbruch „Gelber Stein“ abgesichert.
- b) Die Erschütterungsprognose wird an der Fundament-Außenkante ausgewertet (konservative Annahme).
- c) Aus der Erschütterungsprognose (max. Schwinggeschwindigkeiten) nach Koch werden maximale Bodenbeschleunigungen bestimmt.
- d) Aus den gemessenen Sprengerschütterungen im Nahbereich im Steinbruch „Gelber Stein“ und den prognostizierten maximale Bodenbeschleunigungen werden elastische Antwortspektren ermittelt.
- e) Große Windräder weisen bauartbedingt sehr niedrige Eigenfrequenzen auf, sind somit tiefabgestimmt und reagieren wenig auf Bodenerschütterungen.
- f) In der ungünstigsten Konstellation (Fundament-Außenkante direkt auf Grundstücksgrenze, 120kg Sprengstoff je Zündstufe) entspricht die Belastung der WEA etwa einem Erdbeben der Erdbebenzone 1.
- g) Die Gemarkung Untermarchtal liegt in Erdbebenzone 1. Somit müssen auch alle zukünftig zu errichtenden WEA die Anforderungen für Erdbebenzone 1 erfüllen.
- h) Aktuelle WEA (und sehr wahrscheinlich auch zukünftige, weiterentwickelte Anlagen vergleichbarer Bauart) sind per Typenberechnung für Erdbebenzone 3 nachgewiesen. Damit wäre die Betrachtung auch für künftige WEA gültig.
- i) Somit stellen Sprengerschütterungen, ausgelöst durch Gewinnungssprengungen im Großbohrloch-Sprengverfahren im Steinbruch „Fischersberg“, keine Einschränkung für das Vorranggebiet Windkraft dar.
- j) Wird die zukünftige WEA nicht direkt an der Grundstücksgrenze errichtet, so führt die Vergrößerung des Abstands zu einer Reduktion der Erschütterungen.
- k) Zusätzlich bestehen im Bedarfsfall noch Möglichkeiten (z.B. Reduktion der Ladungsmenge je Zündstufe; Einhalten von Schutzradien nach dem Bau der WEA; Optimierung der Anzahl und der Zündzeitpunkte der Zündstufen) die Erschütterungsimmission seitens des Steinbruchs weiter zu reduzieren.
- l) Nach Bekanntgabe des genauen Standorts und des Anlagentyps der eventuell zukünftig zu errichtenden WEA müssen die prognostizierten Sprengerschütterungen durch Messungen kontrolliert und verifiziert werden.
- m) Sollte im Nahbereich des Steinbruchs eine WEA errichtet werden, so wird empfohlen, bei Sprengarbeiten im Nahfeld (Abstand zur Sprengstelle < 50 m) die Sprengerschütterungen während des Betriebs der WEA zu überwachen.