

Analyse der Windverhältnisse bei Unfällen auf der A44 im Raum Garzweiler und Möglichkeiten der Veränderung

Studie im Auftrag der Autobahn GmbH des Bundes

Abschlussbericht

31.7.2023

Inhaltsverzeichnis

I	Kurzzusammenfassung	6
1	Einleitung und Zielsetzung	7
2	Methodisches Vorgehen	8
2.1	Analyse der Unfallbedingungen	8
2.2	Simulationsaufbau und Simulationsbedingungen	11
2.2.1	Aufbau Simulationen zur Ursachenanalyse	12
2.2.2	Simulation zur Vermeidung des Problems	14
2.2.3	Evaluationsparameter	16
2.3	LKW Unfallwahrscheinlichkeit	18
3	Berechnungsergebnisse	19
3.1	Ergebnisse der Unfallanalyse	19
3.2	Ergebnisse aus den Vermeidungsstrategien	22
3.2.1	Verfüllung der Gruben	22
3.2.2	Windschutzwand an der Autobahn und AgriPV	24
4	Zusammenfassung und Ausblick	32
5	Literaturverzeichnis	34
6	Abkürzungen	35

I Kurzzusammenfassung

Auf der A44 im Bereich des Tagebaus Garzweiler kam es auf dem Neubau der A44, der zwischen Garzweiler I und Garzweiler II durchführt, vermehrt zu vermutlich durch Wind induzierten Unfällen. Dabei handelte es sich um Starkwindereignisse, welche meist eine Windrichtung aus südwestlicher bis westlicher Richtung aufzeigten. Daher lag die Vermutung nahe, dass es einen Zusammenhang zwischen den Windverhältnissen und dem nahen Tagebau Garzweiler II geben könnte.

Es wurde deshalb mit numerischen Strömungssimulationen die Windströmung bei den Starkwindereignissen entsprechenden Winden in und um den Tagebau untersucht. Die hoch aufgelösten, gemittelten Simulationen umfassten dabei das gesamte Gebiet des Tagebaus, um verschiedene mögliche Einflüsse der Grube bestmöglich mitzuerfassen. Simuliert wurden insbesondere zwei verschiedene Windverhältnisse, die zwei unterschiedlichen Unfallereignissen entsprachen.

Die Analyse der Ergebnisse ergab jedoch, dass die Grube als solche keinen direkten Einfluss auf die kritischen Windverhältnisse auf der A44 hat. Sie wirkt vielmehr im Bereich der Autobahn wie eine nicht bebaute Fläche oder ein See, so dass im bodennahen Bereich der Wind vor der Autobahn kaum gebremst wird. Kritisch ist dann, dass die Autobahn in dieser exponierten Lage zum Teil auf einem Damm erhöht geführt wird. Dies führt zu einer Beschleunigung des Windes auf der Autobahn und zu Turbulenzen, die dann sehr wahrscheinlich Unfall verursachend waren.

Anschließend wurden verschiedene Szenarien zur Vermeidung dieser Winde geprüft:

1. **Auffüllen der Gruben Garzweiler I sowie Garzweiler I und II** wurde als Möglichkeit untersucht. Da beide Tagebaue im Moment noch Gruben sind, war die Überlegung, dass der Wind aus der einen Grube kommend in die zweite absteigend, dann auf dem quasi vorhandenen Grat zwischen den Gruben extra beschleunigt würde. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Das Verfüllen von Garzweiler I oder auch beider Gruben zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Windverhältnisse an der Autobahn.
2. **Errichtung einer Windschutzwand** direkt an der Autobahn scheint ein sehr wirksames Konzept zu sein. Es wurden dabei drei mögliche Bauformen untersucht mit einer Wand von 2 m und 4 m Höhe sowie einer Solarwand von 3 m Höhe, bei der der untere Meter frei durchströmt werden kann.
3. **Errichtung von Solarwänden auf landwirtschaftlicher Fläche** zur Kombination der Erzeugung erneuerbarer Energien mit der Vermeidung von Wind auf der Autobahn. Es zeigte sich jedoch, dass der Effekt auf den Wind im betrachteten Konzept zu wenig Wirkung erzielte.

Auf Basis dieser Untersuchungen wird empfohlen entlang der Autobahn neben der Leitplanke eine Form von Windschutzwand aufzustellen. Abhängig von der benötigten Reduktion der Windgeschwindigkeit bieten grundsätzlich alle drei betrachteten Windschutzwände eine effektive Reduktion der Geschwindigkeiten, wobei eine 4 m hohe Wand den stärksten Effekt zeigt und die unten unterströmte Solarwand den geringsten.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Autobahn GmbH des Bundes (kurz Autobahn GmbH) verwaltet und verantwortet den Betrieb der Autobahnen in Deutschland. Dazu gehört auch die Beobachtung von Unfallschwerpunkten und die Erarbeitung von Vorsorgekonzepten.

Zurzeit werden an der A 44 im neu gebauten Abschnitt im Bereich des Tagebaus Garzweiler überdurchschnittlich viele durch Wind verursachte Unfälle registriert. Der Braunkohletagebau Garzweiler besteht aus dem Abbaugelände Garzweiler I und der aktuellen Grube Garzweiler II. Für den Abbau der Braunkohle in Garzweiler II musste die Autobahn A 44 verlegt werden. Die neue Trasse verläuft nun östlich der Grube von Garzweiler II, zwischen Garzweiler II und der noch nicht vollständig aufgefüllten Grube Garzweiler I (siehe 1.1).

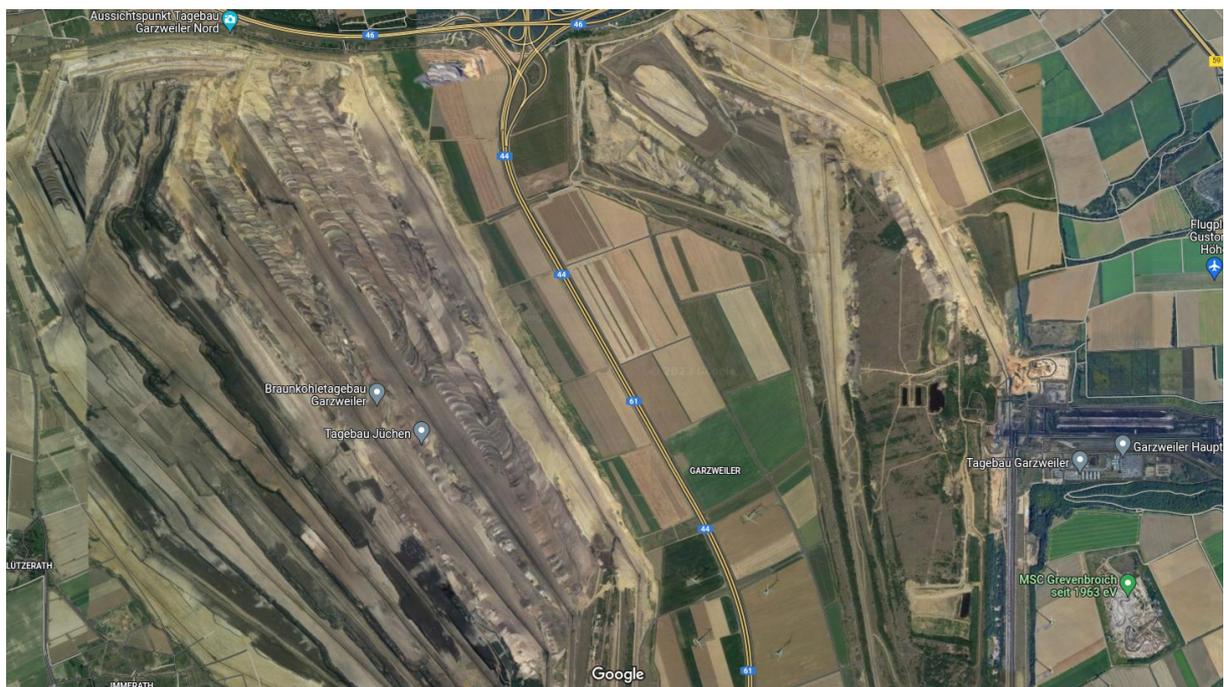


Abbildung 1.1 Satelliten Aufnahme der Tagebauflächen aus Google-Maps zeigt die beiden Tagebaue Garzweiler II links der A44 und Garzweiler I rechts davon, die gerade aufgeschüttet wird, mit der Autobahn in der Mitte von Nord Richtung Süd bis Südsüdost führend (Google, 2023).

Auf dem Autobahnabschnitt zwischen den Autobahnknoten Holz und Jackerath wurden seit der Fertigstellung der neuen Strecke viele durch Wind verursachte Unfälle registriert. Daher wurde die Autobahn bei Starkwind in jüngerer Vergangenheit auch vorsorglich gesperrt. Dieses ist ein auf Dauer nicht hinnehmbarer Zustand. Daher stellt sich die Frage, was geeignete Maßnahmen sind, um die zu Unfällen führenden lokalen Winde zu reduzieren. Dabei galt es auch zu evaluieren, ob die notwendige Maßnahme zur Windreduktion sich möglicherweise auch mit einer nützlichen zur Gewinnung von erneuerbaren Energien kombiniert werden könnte.

2 Methodisches Vorgehen

Um die Ursache für die Unfälle rekonstruieren zu können und für die Zukunft durch eine Veränderung Unfälle durch den Wind zu vermeiden, ist es notwendig ein Bild der Windverhältnisse im betroffenen Abschnitt der A44 im gesamten Raum um die Autobahn zu analysieren. Die Methode der Wahl für eine solche Analyse ist die Nutzung von numerischen Strömungssimulationen (engl. Computational Fluid Dynamics (CFD)) zur Darstellung der Windverläufe in typischen Unfallsituationen. Die Methode ermöglicht auch die Analyse von möglichen Veränderungen zur Vermeidung kritischer Windbedingungen.

2.1 Analyse der Unfallbedingungen

Nach einem Verkehrsunfall auf einer Autobahn wird die Ursache bestimmten Kategorien zugeordnet. Dabei können auch verschiedene Ursachen auf einmal aufgetreten sein. Tabelle 2.1 zeigt die verschiedenen Unfälle mit Datum und Uhrzeit auf der A44 im betreffenden Abschnitt zwischen Oktober 2018 und Oktober 2021, bei denen der Wind als Unfallursache vermerkt wurde. Die Positionen der Unfälle sind auch in Abbildung 2.1 abgebildet.

Tabelle 2.1 Unfälle mit Wind als eine Ursache am Tagebau Garzweiler auf der A44 sowie die Windgeschwindigkeit gemessen zu dem Zeitpunkt an der Station Bunker Ost (siehe Abb. 2.2).

Datum	Zeit	Straße	A	Ort km	Fahrzeug	Wind [m/s]
30.10.2018	19:05	A	44	51,950	Lkw	7,9
07.12.2018	22:32	A	44	50,000	Pkw	14,6
28.01.2019	06:05	A	44	48,900	Pkw	9,9
04.03.2019	05:00	A	44	52,550	Lkw	12,0
11.03.2019	11:19	A	44	52,000	Lkw	27,6
13.03.2019	10:45	A	44	52,300	Lkw	14,2
24.04.2019	19:07	A	44	52,144	Lkw	10,7
08.06.2019	18:40	A	44	49,500	Pkw	9,1
27.10.2019	00:02	A	44	51,790	sonst	9,7
08.12.2019	20:00	A	44	52,900	Pkw	9,9
28.01.2020	12:43	A	44	52,184	Lkw	12,2
28.01.2020	13:25	A	44	51,500	Pkw	12,2
28.01.2020	13:35	A	44	52,600	Pkw	12,2
16.02.2020	08:51	A	44	51,100	Pkw	15,6
17.02.2020	13:28	A	44	52,100	sonst	21,9
09.03.2020	09:10	A	44	51,000	Lkw	13,6
01.10.2020	15:33	A	44	50,500	Lkw	6,7
11.03.2021	09:08	A	44	52,000	Lkw	12,8
13.03.2021	08:20	A	44	50,800	Pkw	15,8
04.05.2021	13:05	A	44	51,550	Lkw	12,9
21.10.2021	08:21	A	44	52,900	Lkw	14,6
21.10.2021	08:48	A	44	52,100	Lkw	14,6

Uhr. Die Unfälle ereigneten sich dabei auf entgegengesetzten Fahrtrichtungen. Als unbeeinflusste Datenquelle für eine Windmessung wurde als Referenz die Messung der Windenergieanlage (WTG) 91821 des Windparks Titz verwendet. Bei dem Windpark handelt es sich um 2 MW Anlagen des ehemaligen Herstellers Senvion mit einem Rotordurchmesser von 92,5 m und einer Nabhöhe von 100 m. Die verwendete Anlage ist bei westlichem Wind nicht durch andere WTG beeinflusst und der Wind kann somit als unbeeinflusst angesehen werden. Die Winddaten dieser Fälle sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2 Referenz Windbedingungen, die aus den Messungen zu Zeitpunkten von Unfällen entnommen wurden. Die sich zu Tabelle 2.1 ergebenden Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten werden durch die unterschiedliche Höhe und fehlende Umbegungsbeeinflussung der Messung an der WTG verursacht.

Datum	Uhrzeit	Windrichtung [°]	Windgeschwindigkeit [m/s in 100 m]
28.01.2020	13:35	250	17,4
21.10.2021	08:21	275	24,4

Abbildung 2.2 zeigt die Bezugsorte für die Ereignisse, auf die sich die Simulationen beziehen (Satellitenbild aus Google Maps). Das grüne Symbol ganz links (Titz WEA 91821) kennzeichnet die Windkraftanlage, die als Datenquelle für die Windgeschwindigkeit verwendet wurde. Sie wurde wegen ihres relativ ungestörten Standorts im Westen von Garzweiler II ausgewählt. Die Unfallstellen sind durch rote Symbole gekennzeichnet.



Abbildung 2.2 Betrachtete Unfallorte, Messstationen und Standorte der Windenergieanlagen aus denen Daten zur Windanalyse bezogen wurden.

2.2 Simulationsaufbau und Simulationsbedingungen

Die Simulationen wurden mit dem Open Source Code OpenFOAM durchgeführt (Jasak, 2009). Das Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme (IWES) hat zur Verbesserung der Windanalysen - insbesondere im Bereich der Windenergie - verschiedene Erweiterungen zu der offiziellen Variante hinzugefügt, die die Ergebnisse erheblich verbessern können (Chang u. a., 2018; Schmidt, Peralta und Stoevesandt, 2012; Akbarzadeh u. a., 2019).

Die betrachteten Ereignisse fanden unter Sturmbedingungen tagsüber statt. Das bedeutet, dass in diesem Fall von einer neutralen atmosphärischen Schichtung ausgegangen werden kann. "Neutral" bedeutet hier, dass es keinem Einfluss einer Thermik unterliegt, was u.a. an der starken sturmbedingten Durchmischung liegt. Um den Einfluss des Tagebaus genau beurteilen zu können, wurde der gesamte Tagebau von Garzweiler I und II in die Simulation mit einbezogen. Zusätzlich musste die weitere Umgebung mit größerer Auflösung im Umkreis einbezogen werden, um eine physikalisch korrekte Darstellung der Windströmung in dem Interessengebiet sicherzustellen. Abbildung 2.3 zeigt eine Darstellung der gesamten simulierten Umgebung der Autobahn.

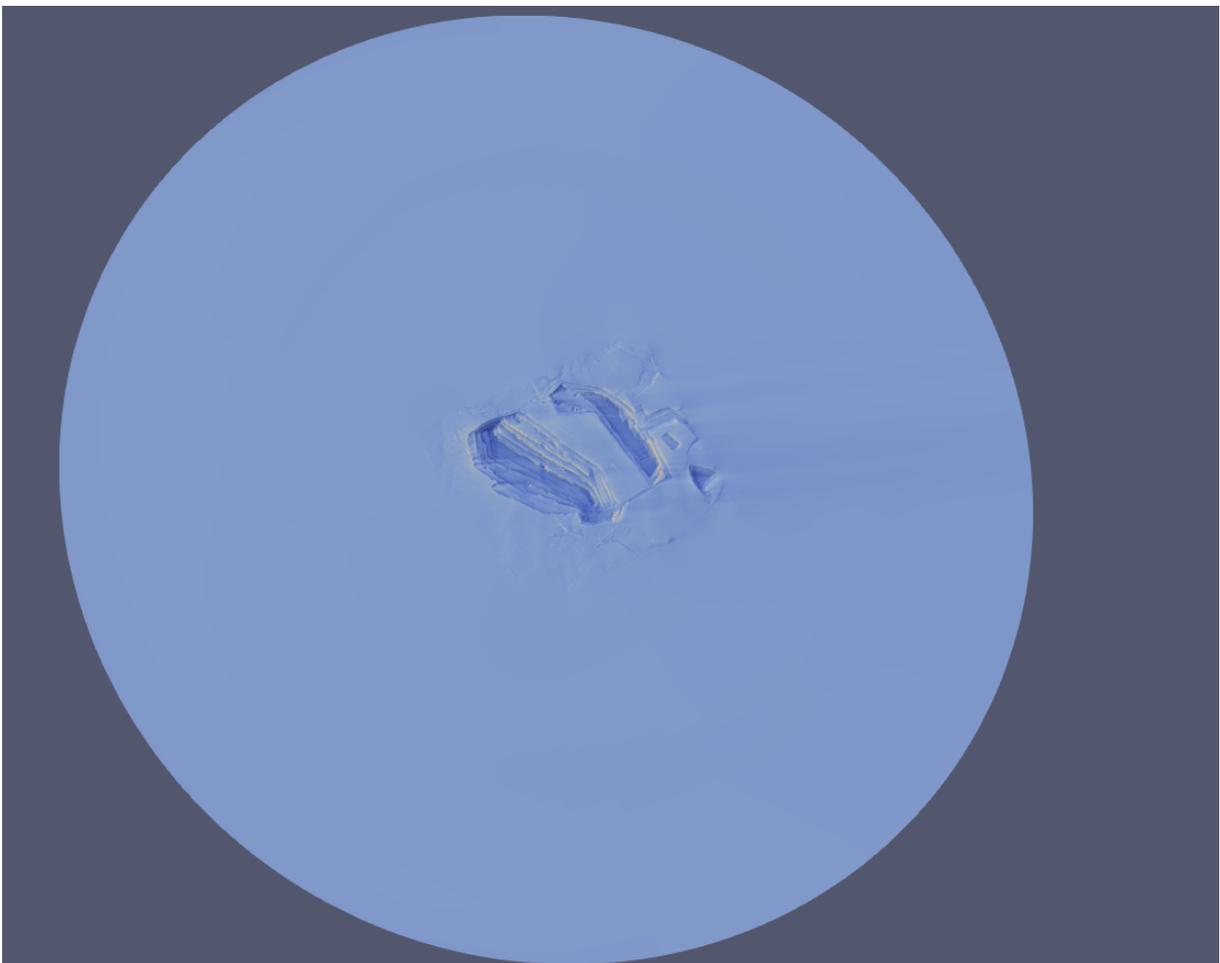


Abbildung 2.3 Das Gelände, welches in der Simulation mit einbezogen wurde. Die Farbgebung entspricht der oberflächennahen Windgeschwindigkeit. Die Tagebaugruben sind darin deutlich zu erkennen.

Eine Schwierigkeit bei der Festlegung der Simulationsbedingungen war, dass die Umgebung sich durch den Tagebau ständig verändert. Es wurde daher vereinbart den Zustand des Tagebaus an den Tagen der ausgewählten Unfälle, also am 28.01.2020 und am 21.10.2021, als Grundlage für die Simulationen zu nehmen. An diesen Tagen lagen sowohl Unfallgeschehen als auch Geländedaten

vor. Diese von RWE zur Verfügung gestellten Geländedaten wurden als Basis für alle Simulationen im Weiteren verwendet.

Simuliert wurde dabei der Verlauf der mittleren Windgeschwindigkeit unter Nutzung des $k - \varepsilon$ -Turbulenzmodells² (engl. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) Simulation). Dabei wird die Turbulenz in Form einer turbulenten kinetischen Energie dargestellt.

2.2.1 Aufbau Simulationen zur Ursachenanalyse

Da die verwendete Methode der Simulation von sehr unterschiedlicher Qualität sein kann und diese Qualität vom Aufbau der Simulation abhängt, sind im Folgenden Detailinformationen zum Aufbau und der Simulation aufgeführt. Diese sind vor allem für ein Fachpublikum gedacht, um die Qualität nachvollziehbar zu machen. Für das Verständnis der Ergebnisse kann dieser Abschnitt auch übersprungen werden.

Um die Windströmung in dem gesamten Raum oberhalb der Geländeoberfläche berechnen zu können, muss der Raum aufgeteilt werden. In dem von OpenFoam benutzten Verfahren der finiten Volumen geschieht dies durch ein sogenanntes Rechengitter, welches den gesamten Luftraum des zu berechnenden Gebiets aufteilt. Pro Gitterelement wird ein Wert berechnet für die Geschwindigkeit des Windes, den Luftdruck sowie die turbulente kinetische Energie und Dissipation der Turbulenz an dem Ort des Gitterelements - genannt Zelle.

Zur Erstellung des Rechengitters wurde der von Fraunhofer IWES entwickelte Gittergenerator **terrainMesher** verwendet. Die verwendeten Gitter erstreckten sich auf einen rechteckigen Innenteil von 24x24 Quadratkilometer (km²), zu denen ein äußerer runder Randbereich mit einem Gesamtdurchmesser von 52 Kilometer (km) hinzugefügt wurde.

Das erste Gitter hatte eine horizontale Auflösung von 20 m, im gesamten Innenteil des Gitters mit einer minimalen vertikalen Auflösung von 1 m am Boden. Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch das Bodengitter. Das Gitter wurde rotiert für jede Windrichtung, so dass der Verlauf der Gitterzellen parallel zur Hauptwindrichtung lag.

Da sich im Verlauf des Projekts herausstellte, dass die exakte Geometrie des Tagebaus einen geringeren Einfluss auf die Strömung hat, jedoch lokal an der Autobahn Gegenmaßnahmen untersucht werden sollten, wurde ein zweites Gitter generiert. Um Gegenmaßnahmen in Form von verschiedenen Windschutzwänden in der Simulation genau genug zu erfassen, wurde die Auflösung des Gitters im Bereich der Autobahn so verfeinert, dass die feinsten Gitterzellen in der horizontalen Auflösung einem Abstand von 0,625 m entsprachen. Da sich dadurch die Anzahl der Gitterzellen im Bereich der Autobahn im Raum der untersuchten Unfälle deutlich erhöhten, wurde die Auflösung in der weiter entfernten Umgebung der Gruben auf 40 m vergrößert. Der Bereich, der dabei verfeinert werden musste hing von der Ausdehnung der Gegenmaßnahme ab. Ein resultierendes Gitter ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Dies bestand aus ca. 57 Millionen Gitterzellen. Die Simulation mit mehreren Wänden umfasste über 80 Millionen Gitterzellen. Alle Simulationen wurden am Ende mit der verfeinerten Auflösung des Autobahnbereichs durchgeführt und ausgewertet.

² $k - \varepsilon$ -Turbulenzmodell: Modelliert die Turbulenz in Simulationen mit zwei partiellen Differentialgleichungen als Transportgleichungen:

k = turbulente kin. Energie

ε = isotrope Dissipationsrate - was der Rate, der nach allen Richtungen hin gleiche physikalische und chemische Eigenschaften aufweisenden kinetische Energie entspricht, die in innere Wärmeenergie umgewandelt wird.

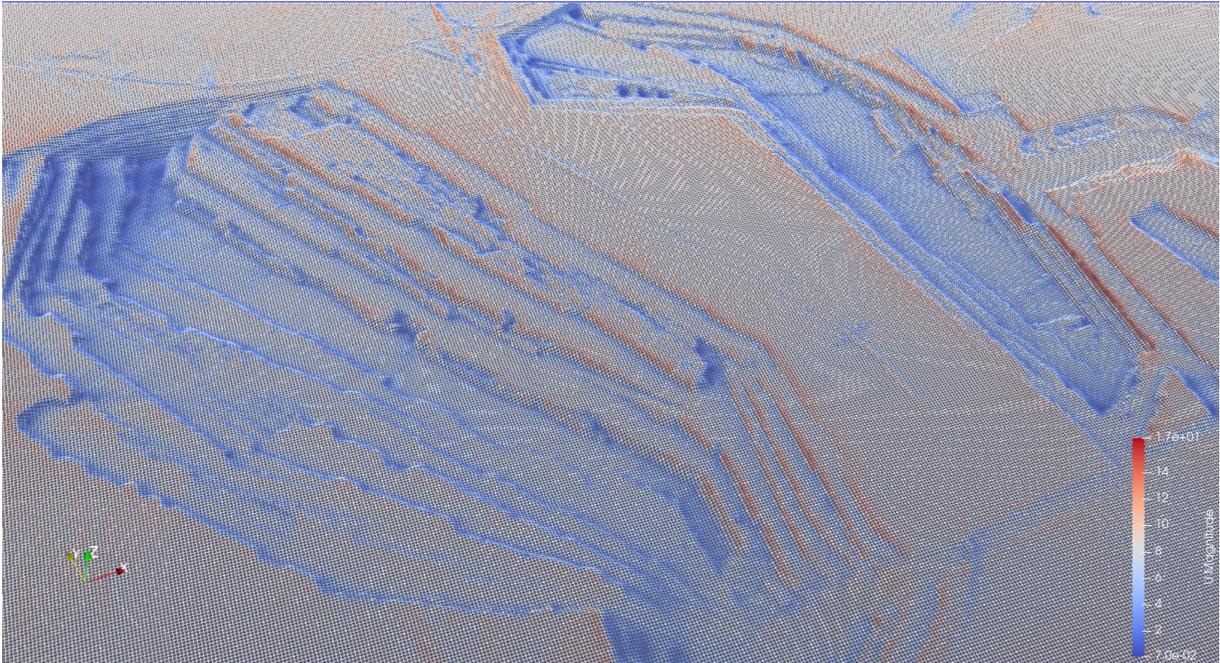


Abbildung 2.4 Das Gitter in der horizontalen Auflösung im Bereich der Tagebaugruben und der Autobahn, die dazwischen zum Teil auf einem Damm verläuft.

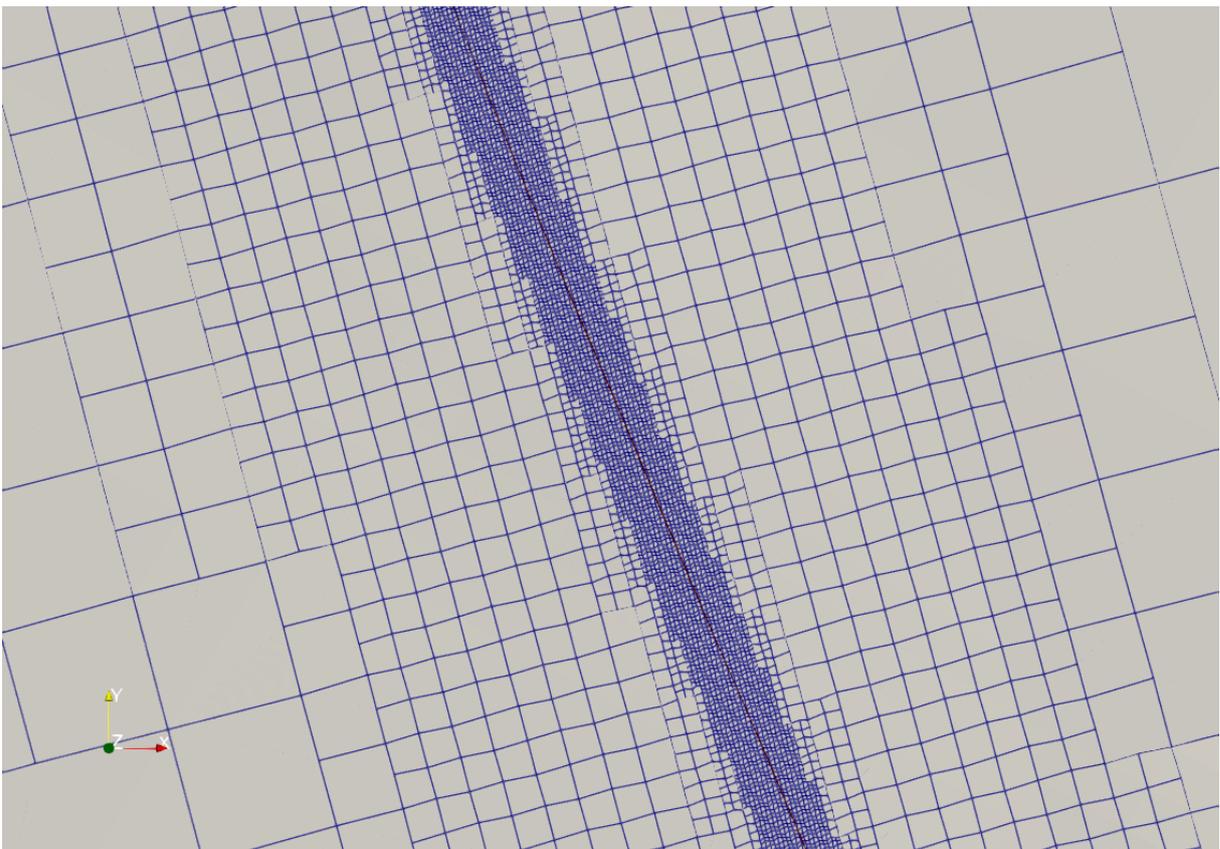


Abbildung 2.5 Horizontale Aufsicht auf den Boden des Rechengitters der Simulation mit hinreichender Auflösung der Windschutzwand, mit einer Verfeinerung im Bereich der Autobahn mit der Wand und einem gröberem Gitter in größerer Entfernung.

Als Randbedingung wurde für die Simulation ein neutrales Windprofil angenommen. Da es in den Windmessungen sowohl in der Stärke als auch in der Richtung Unsicherheiten geben kann und

die Unfälle insgesamt auch unterschiedliche Windbedingungen aufwiesen, wurde eine Serie von verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Richtungen für die beiden Fälle untersucht. Tabelle 2.3 zeigt die untersuchten Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe und Windrichtungen für die zwei Fälle. Für die Turbulenz wurde eine Vorsimulation durchgeführt, um als Randbedingung ein konsistentes vertikales Turbulenzprofil zu erzeugen. Der Druck wurde als **outletInlet** an den Rändern gesetzt, was eine typische Randbedingung in solchen Simulationen ist.

Tabelle 2.3 *Simulierte Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in 100 m Höhe entsprechend der zwei Unfallzeitpunkte. Es wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung variiert um eine Sensibilität gegenüber möglichen Messungenauigkeiten zu erfassen. Die Variante 0, entspricht den am Unfalltag gemessenen Werten und wird im Weiteren als Basis-Variante bezeichnet.*

Fall 28.01.2020			Fall 21.10.2021		
Variante	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung [°]	Variante	Windgeschwindigkeit [m/Sekunde (s)]	Windrichtung [°]
0	17,392	250,585	0	24,496	275,4
1	19	250,585	1	10	275,4
2	15	250,585	2	15	275,4
3	12	250,585	3	20	275,4
4	17,392	240	4	28	275,4
5	17,392	230	5	24,496	245
6	17,392	220	6	24,496	260
7	17,392	260	7	24,496	290
8	17,392	270			
9	17,392	280			

2.2.2 Simulation zur Vermeidung des Problems

Es wurden zu Beginn des Projekts verschiedene Strategien zur Vermeidung des Problems diskutiert und vereinbart diese zu verfolgen. Diese waren:

1. Die Annahme einer verfüllten Grube in Garzweiler I sowie eines Sees in der Grube Garzweiler II. Die Vermutung war, dass die Gruben in Garzweiler I und II dazu führen könnten, dass der Wind beschleunigt über die Autobahn geleitet würde. Aus Perspektive der Sohle von Garzweiler II verläuft die Autobahn zur Zeit auf dem Grat einer Hügelkette. Dies führt bei regulären Hügeln u.a. zu einer Beschleunigung auf der Spitze von Hügeln. Eine Verfüllung der Gruben könnte dann zu einer Windänderung führen, die den Wind auf der Autobahn reduziert.
2. Eine klassische Windschutzwand direkt am Rand der Autobahn.
3. Die Nutzung von senkrechten Solarwänden auf den Feldern also landwirtschaftliche Photovoltaik (AgriPV) nahe der Autobahn um die bodennahen Winde so zu beeinflussen, dass die bodennahe Grenzschicht nach oben gedrückt würde und dadurch möglicherweise an der Autobahn direkt der Wind deutlich reduziert würde. Diese Variante hätten den Vorteil, dass mit dem Bau von Windschutzmaßnahmen gleichzeitig noch erneuerbare Energien gewonnen werden könnten.

Im Fall der verfüllten Gruben wurde dazu angenommen, dass die Grube Garzweiler I ebenerdig verfüllt wird und eine Bodenrauigkeit der umgebenden landwirtschaftlich genutzten Fläche annimmt. Im zweiten Fall wurde zusätzlich noch die Verfüllung von Garzweiler II mit Wasser untersucht. Beide Fälle entsprechen bestimmten Entwicklungen im geplanten Verlauf des Tagebaus. Ein möglicher

Bewuchs durch Bäume wurde nicht mit in die Betrachtung einbezogen, da dieser unklar ist. Abbildung 2.6 zeigt die veränderte Umgebung bei der Verfüllung von Garzweiler I. Die dafür notwendige Veränderung von Garzweiler II in Bezug auf Aushub wurde nicht mit einbezogen, da sich die Veränderung vor allem auf der westlichen Seite des Tagebaus abspielen würde, um mehr Aushub zu erzeugen. Der Einfluss der Größe der Grube wurde somit vernachlässigt, was sich aber auch als nicht relevant herausstellte (siehe Abschnitt 3).

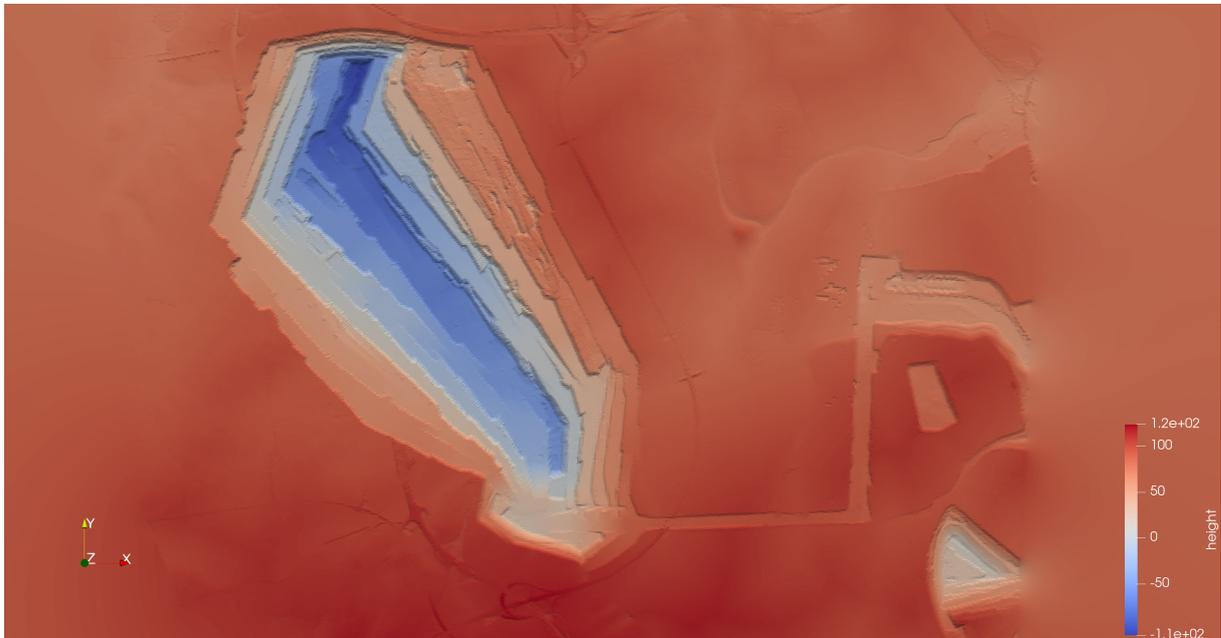


Abbildung 2.6 Das Gelände des Tagebaus mit verfüllter Grube von Garzweiler I.

Abbildung 2.7 zeigt die Umgebung nach der zusätzlichen Befüllung von Garzweiler II mit Wasser. Das Rechengitter wurde in dieser Simulation nur in Bezug auf die Abwesenheit der Grube in Garzweiler I bzw. Garzweiler I und II verändert. Die Simulationsbedingungen entsprechen also denen während der Ursachenanalyse.

Die klassische Windschutzwand wurde hinter der Leitplanke direkt an der Strecke der Autobahn entlang geführt. Abbildung 2.8 zeigt im Entwurf die ungefähre Positionierung der Wand an der Autobahn. In einer ersten Simulation wurde eine Wand mit einer Höhe von 4 m angenommen. Diese wurde entlang der Gitterzellen auf dem gesamten Abschnitt der Autobahn als undurchlässige Wand in der Simulation mitgeführt. Auf der gleichen Position wurden zudem Wände mit einer Höhe von 2 m sowie mit einer Wand aus Solarzellen, die dem unten stehenden Prinzip der AgriPV entsprachen, eingefügt und jeweils simuliert. Daraus ergaben sich verschiedene Informationen zum Windverlauf in der Vertikalen bei unterschiedlichen Wandbauweisen. Ausgewertet wurden die Simulationen in der Mitte der Autobahn zwischen den Fahrspuren in südlicher und nördlicher Richtung, sowie an den in Abbildung 2.8 aufgezeigten roten Punkten. Die Punkte entsprechen einem Fahrzeug, das in südlicher Richtung nahe der neuen Windschutzwand, in der Mitte der Fahrbahn bzw. in nördlicher Richtung auf der am weitesten von der neuen Windschutzwand entfernten Fahrbahn am Fahrbahnrand fährt. Letzteres entspräche einem Motorrad, welches an diesem Rand fährt. Da erwartet wurde, dass der Schutz durch Wände mit zunehmendem Abstand abnimmt, entspricht diese Wahl der konservativsten Annahme. Es gilt auszuschließen, dass es zu einer Gefährdung irgendeines Fahrzeugs auf den Fahrspuren gibt. Mit dieser Form der Auswertung war es möglich, eine Aussage über den gesamten Bereich der Fahrbahn zu treffen.

Die Nutzung von Solarwänden auf den in Hauptwindrichtung vorgelagerten Feldern, die einer Doppelnutzung als Windschutz und zur Erzeugung erneuerbarer Energien dienen könnten, ist grafisch

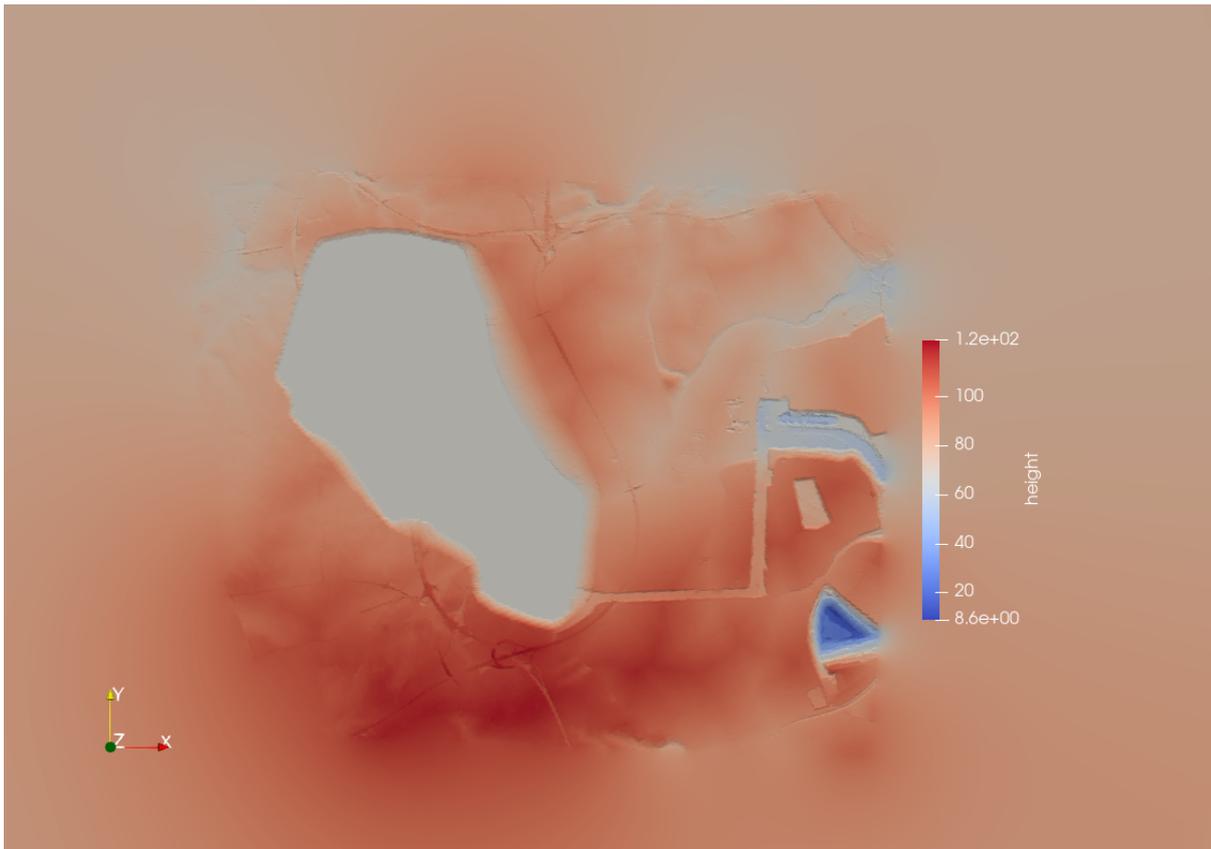


Abbildung 2.7 Das Gelände des Tagebaus mit verfüllter Grube von Garzweiler I sowie des verfüllten Tagebaus Garzweiler II mit einem See.

in Abbildung 2.8 links neben dem Damm der Autobahn dargestellt. Der Abstand zwischen den hier angenommenen drei einzelnen Wänden wurde auf 10 m gesetzt, damit die Solarwände sich gegenseitig wenig verschatten. Als mögliches System für einen solchen Aufbau wurden Wände des Herstellers Next2Sun gesehen (*Next2Sun Konzept für AgriSolar-Anlagen* 2022). Dazu wurde mit dem Hersteller über die jetzigen technischen Möglichkeiten solcher Wände diskutiert. Nach Angaben des Herstellers würden für diesen Zweck bei den beschriebenen Windbedingungen Wände in Betracht kommen, die eine Höhe von 3 m haben. Da die Wände aufgeständert werden, würde zwischen Boden und Wand ein Abstand von 1 m bestehen. Die Wände werden bei Wind also auch unterströmt, was die Lasten auf den Wänden reduziert. Das resultierende Gitter umfasste dann 82 Millionen Zellen. Solche Wände wurden parallel zur Autobahn im Gebiet der angrenzenden Felder in die Simulation eingeführt.

2.2.3 Evaluationsparameter

Die entscheidende Größe für die Unfälle ist die Windgeschwindigkeit. Diese nimmt mit der Höhe über dem Boden zu. Der Verlauf der Zunahme hängt dabei von der Umgebung, also dem Ort und der Windgeschwindigkeit in der Höhe ab. Die Simulationen enthalten die volle Information über das Strömungsfeld des Windes. Es wurde ausgewertet, wie die eigentliche Strömung des Windes, aus der Grube des Tagebaus kommend, auf die Autobahn trifft und daher durch die Grube beeinflusst wird. Im Fall der Vermeidungsmaßnahmen wurden entsprechende Auswertungen in Bezug auf die Maßnahmen vorgenommen.

Neben der Windgeschwindigkeit war die turbulente kinetische Energie dabei zentraler Auswertungsparameter. Die turbulente kinetische Energie bezieht sich dabei auf Schwankungen der Wind-

geschwindigkeit, welche in diese Größe umgerechnet werden kann. In der Natur handelt es sich dabei vor allem um Wirbel, da schnelle Änderungen in Strömungen in einem Gebiet zu Wirbeln führen. Es lässt sich die in den Rechnungen ermittelte turbulente kinetische Energie (k) in eine Standardabweichung (σ) der mittleren Windgeschwindigkeit und von dieser auf eine genormte Turbulenzintensität (TI) umrechnen.

2.3 LKW Unfallwahrscheinlichkeit

Laut Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) Forschungsbericht Nr. 45 (2016) sind 2-3% aller LKW Unfälle von Seitenwind verursacht (Report, Abb 4-18)(Ludwig, 2016).

Verglichen mit dem Gesamtdurchschnitt von 2-3% ist der Anteil der Unfälle, die durch Seitenwind verursacht werden, bei den LKW mit einem maximalen Gewicht von 12t mit 12% wesentlich höher (Bericht, Abb. 4-28). Außerdem ereignen sich die meisten Unfälle in den Wintermonaten (November bis April), wo auch die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe am höchsten sind (Abb. 4-35). Der GDV führte eine Vergleichsstudie von 12t und 40t LKWs durch und stellte fest, dass die schwereren (40t) LKWs bei Seitenwinden über 16 m/s instabil waren, während leicht beladene LKWs (12t) bei Seitenwinden über 10 m/s in 10m Höhe über dem Boden instabil wurden.

Dies ist für diese Studie sicher nur eine Richtschnur, gibt jedoch eine gute Auskunft, in welchen Größenordnungen relevante Windgeschwindigkeiten für Unfälle von LKW liegen. Auf der A44 im hier betrachteten Abschnitt sind zwar mehr LKW durch Winde verunfallt, aber nicht ausschließlich. Trotzdem helfen diese Zahlen, um sich ein ungefähres Bild zu machen, welche Winde wann eine Gefahr darstellen können. Allerdings hängt am Ende die Windgeschwindigkeit auf der Autobahn mit und ohne Windschutz auch immer davon ab, wie stark der Wind von außen weht. Auch die beste Windschutzwand verringert zwar den Wind in einem Hurrikan, kann aber ggf. Unfälle wegen der immer noch zu hohen Windgeschwindigkeiten auf der Autobahn nicht verhindern.

3 Berechnungsergebnisse

Die Simulationen wurden auf dem Hochleistungsrechner der Universität Oldenburg (EDDY) durchgeführt. Alle Berechnungen wurden bis zu einer Konvergenz der Druckergebnisse in Wertbereichen $\leq 10^5$ durchgeführt, um konsistente Ergebnisse zu erhalten. Da die Simulationen jeweils für jede Gitterzelle Werte für Wind und Turbulenz generiert, ist es sinnvoll sich in der Auswertung gezielte Punkte herauszusuchen, die genauer analysiert werden. Für alle Simulationen wurden deshalb sogenannte Points of Interest (Wichtige Punkte in der Simulation, die ggf. ausgewertet werden) (Pol) entlang der Strecke der Autobahn festgelegt (Abbildung 3.1). An diesen Punkten sowie den zwei ausgewählten Unfallorten, wurden Ergebnisse aus den Simulationen für eine mögliche weitere Auswertung direkt herausgeschrieben.



Abbildung 3.1 Punkte mit markierten Streckenkilometern entlang der Autobahn, die in der Simulation ausgewertet wurden.

3.1 Ergebnisse der Unfallanalyse

Wie sich herausstellte, waren die Windverhältnisse auf den ausgewerteten Pol an der Autobahn recht unbeeinflusst von der westlich in Windrichtung vorgelagerten Grube. Allerdings stellte die Grube auch kein Hindernis für den Wind dar, durch das der Wind reduziert werden konnte. D.h. der Wind verhält sich östlich der Grube von Garzweiler II aus Windrichtung kommend, ähnlich dem Wind nach sehr flachem Gelände, wie es z.B. in Meeresgebieten vorherrscht. So trifft der Wind im Bereich der Autobahn horizontal kaum gebremst auf die Fahrzeuge auf der Autobahn. Dabei erfolgt noch eine Beschleunigung des Windes, wenn er über den Damm der Autobahn weht, wenn diese auf einem Damm geführt wird.

Abbildung 3.2 zeigt der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über dem Boden der Simulationsvarianten 0, 5, 6, und 7 für die Windgeschwindigkeit im Fall des 21.10.2021. Dies ist der Fall mit der höheren Windgeschwindigkeit, der deshalb die extremeren Auffälligkeiten im Wind aufweisen sollte. Die Szenarien untersuchen dabei den Einfluss der Windrichtung auf das Ergebnis. Die

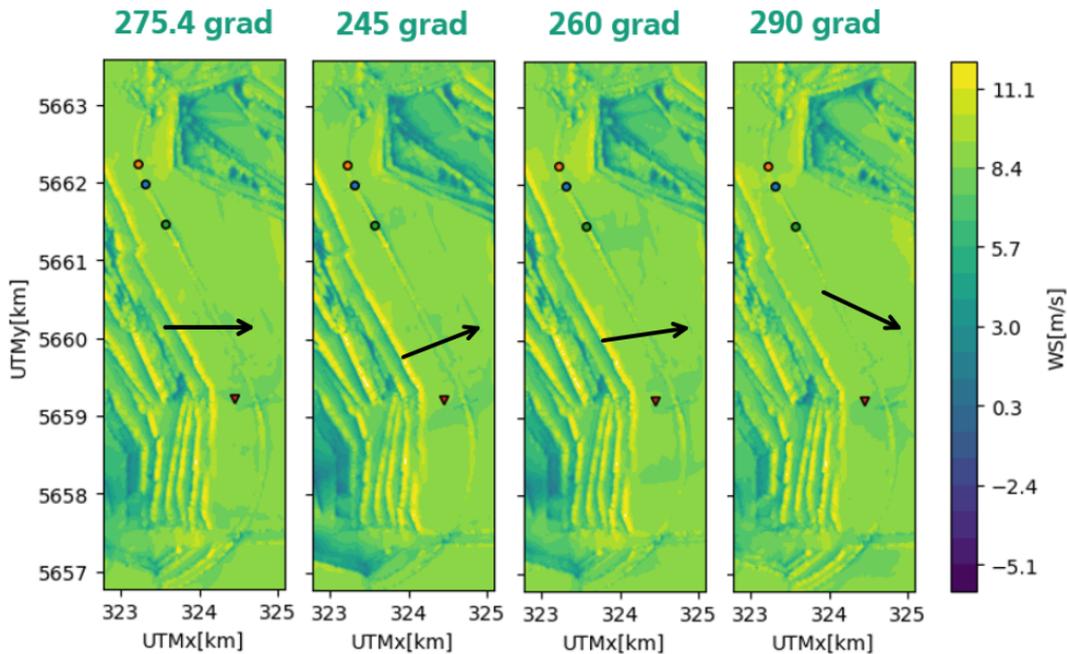


Abbildung 3.2 Geschwindigkeit des Windes jeweils in 2 m Höhe über dem Boden. Die Farben entsprechen den jeweiligen Windgeschwindigkeiten bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die Punkte stellen Unfallstellen auf der Autobahn dar. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation.

oberen Punkte markieren hier Unfallstellen auf der Autobahn. In der Simulation ist deutlich der Verlauf der Autobahn auf einem Damm zu erkennen, weil es dort zu einer Geschwindigkeitszunahme des Windes kommt. Allerdings ist direkt vor dem Verlauf der Autobahn auf den angrenzenden Feldern keine auffällige Veränderung der Windgeschwindigkeit zu erkennen. Die Böschungskanten des Tagebaus hingegen zeigen jeweils an der Böschung eine klare Beschleunigung des Windes. Diese Beschleunigung reicht jedoch nicht sehr weit. Das Phänomen scheint unabhängig von den betrachteten Windrichtungen zu sein.

Um dies genauer zu betrachten wurden auch die Veränderung der Windrichtung durch den Tagebau bzw. die Landschaft, die vertikale Luftströmung und die TI ebenfalls in 2 m Höhe untersucht und in Abbildungen 3.3, 3.4 bzw. 3.5 dargestellt. Die Differenzen zwischen den Grafiken sind marginal. Bei insgesamt westlichen Winden ist ein Einfluss der Windrichtung auf die Strömung auf der Autobahn in dem untersuchten Bereich augenscheinlich vernachlässigbar. Dies wäre nicht der Fall gewesen, wäre es zu größeren Strömungsablösungen aus dem Tagebau heraus gekommen. Diese hätten starke vertikale Strömungen verursacht, die zu massiven Wirbeln im weiteren Verlauf geführt hätten. Solche Strömungen traten aus dem Tagebau heraus jedoch nicht auf. Es wurde vielmehr festgestellt, dass eine Variation der Windrichtung in der Anströmung im Bereich von 245 – 290 Grad keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Deshalb wurden weitere Untersuchungen mit der Windrichtung der Basis-Variante 0 durchgeführt.

Die Ursache für die starken Winde in dem betreffenden Autobahnabschnitt liegen nicht darin, dass der Tagebau zu abgelöster Strömung und zu starken vertikalen Wirbeln führt. Vielmehr liegt die Ursache vor allem in der Abwesenheit von Wind bremsenden Elementen über eine Strecke von mehreren Kilometern in westlicher Hauptwindrichtung bzw. der Windrichtung aus der ein Großteil der Stürme auftritt. Der Damm, auf dem die Autobahn zum Teil geführt wird, verstärkt den Effekt noch.

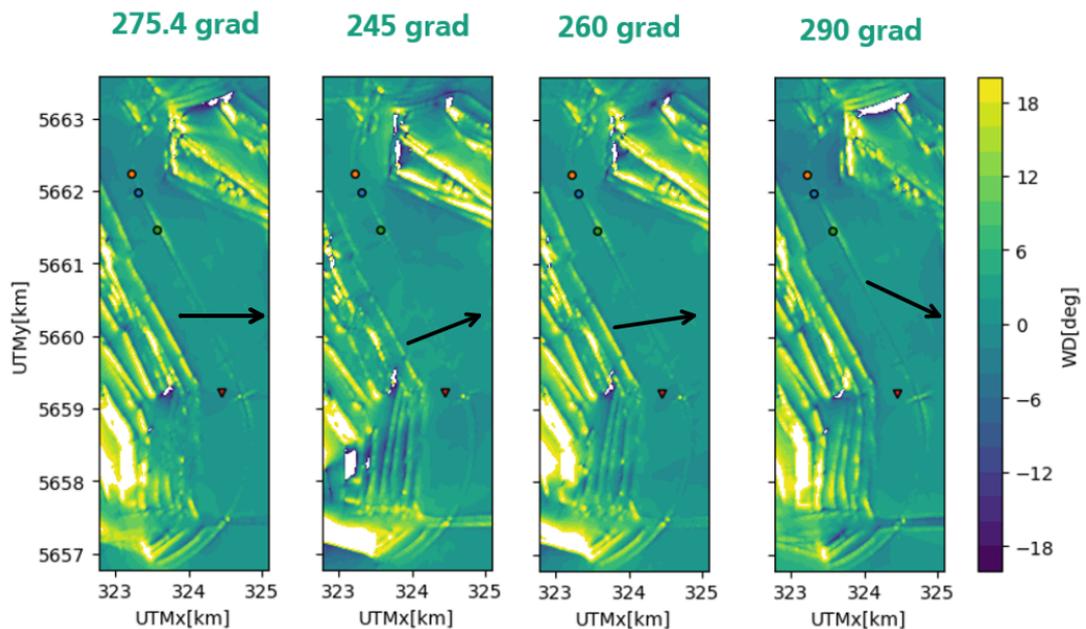


Abbildung 3.3 bildet die Veränderung der Richtung des Windes in 2 m über dem Gelände gegenüber dem von außen einströmenden Wind ab. Die Farben entsprechen den jeweiligen Veränderungen der Windrichtung in Grad gegenüber den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation.

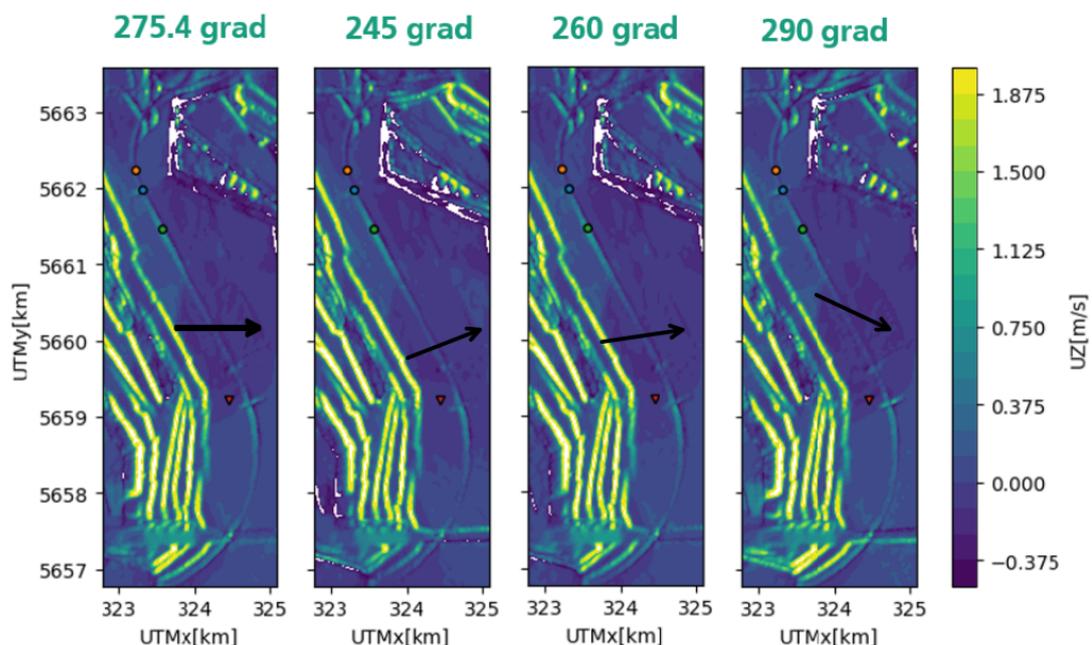


Abbildung 3.4 Zeigt die Geschwindigkeit des vertikalen Windes in 2 m über dem Gelände. Die Farben entsprechen den jeweiligen Windgeschwindigkeiten des Windes in vertikaler Richtung bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation. Da die Grundrichtung des Windes horizontal ist, sind diese Winde durch das Gelände verursacht. Ein Einfluss des Tagebaus auf den Bereich der Autobahn ist nicht zu erkennen.

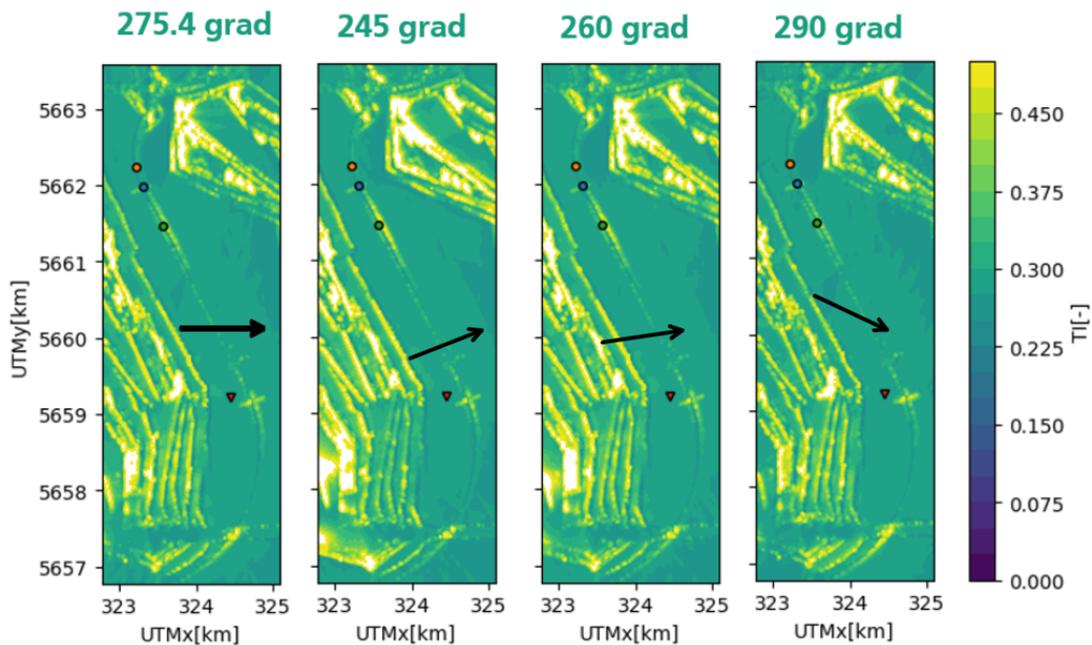


Abbildung 3.5 Zeigt die Turbulenzintensität des Windes in 2 m über dem Gelände. Die Farben entsprechen der jeweiligen Turbulenzintensität bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation. Es wird deutlich, dass die TI sehr lokal an den Steigungen im Gelände erhöht ist. Eine erhöhte Turbulenz an der Autobahn durch die Böschungskanten des Tagebaus ist nicht zu erkennen.

3.2 Ergebnisse aus den Vermeidungsstrategien

Da die Ergebnisse der Unfallanalyse keine wesentliche Sensitivität bezüglich der Windgeschwindigkeiten oder der Windrichtung aufzeigten, sondern bei allen Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten ähnliche Effekte an den spezifischen Stellen auf der Autobahn auftraten, wurden die Vermeidungsstrategien ausschließlich mit den Windgeschwindigkeiten, welche den Unfällen entsprachen also der jeweiligen Basis-Variante 0 aus Tabelle 2.3 durchgeführt.

3.2.1 Verfüllung der Gruben

Schon bei der Unfallanalyse zeigte sich, dass der Einfluss der Gruben auf den lokalen Wind an der Autobahn gering ist. Daher trägt auch die Verfüllung der Gruben zu kaum einer Verringerung der Windgeschwindigkeit bei. Dies zeigte sich auch bei der Simulation der verfüllten Tagebaue in der im Moment geplanten Form. Die Verfüllung hatte keinen signifikanten Einfluss. Es wurde jeweils simuliert, wie der Wind sich verhält, wenn Garzweiler I östlich der Autobahn alleine und Garzweiler I & II insgesamt entsprechend der Planung verfüllt würden.

Abbildung 3.6 zeigt einen vertikalen Querschnitt der Windgeschwindigkeiten am Unfallort des 21.10.2021, um 08:21 Uhr, ohne und mit Verfüllung der Gruben. Aus der qualitativen Betrachtung wird schon deutlich, dass die Unterschiede in der Windgeschwindigkeit zwischen den gerechneten Simulationen kaum zu erkennen sind. Dies bestätigt sich auch bei der Betrachtung der Windgeschwindigkeit auf 2 m Höhe über dem Grund in Abbildung 3.7. Auch hier sind im Autobahnabschnitt um die Unfallstelle, die mit rotem Punkt markiert ist, kaum Unterschiede auszumachen. Unterschiede zeigen sich im Wesentlichen im Bereich der veränderten Gruben. Allerdings fallen auch dort die Unterschiede mit 1 m/s Differenz sehr gering aus.

Quantitativ lassen sich die fehlenden Unterschiede mit vertikalen Windprofilen, die in der Mitte der Autobahn auf Höhe der Unfallstelle aufgenommen wurden, darstellen. In Abbildung 3.8 links

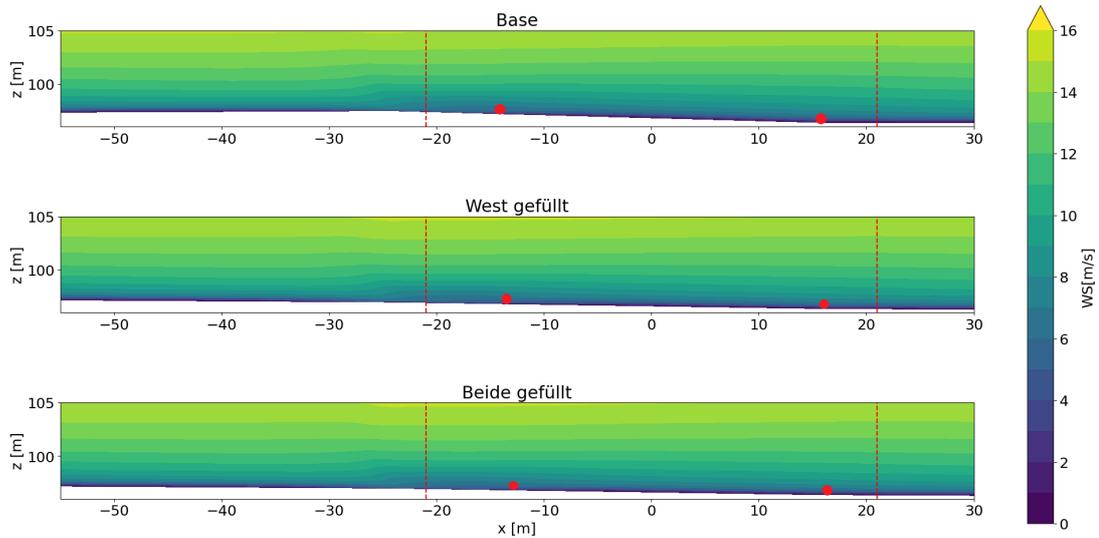


Abbildung 3.6 stellt die Windgeschwindigkeit im Gelände über der Autobahn mit und ohne Verfüllung der Gruben in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche dar. Die obere Abbildung zeigt farblich die Windgeschwindigkeit an der Autobahn im Fall der Simulation des Zustandes der Gruben während des Unfalls am 21.10.21 (Base). Es ist horizontal der Abstand in Metern von der Mitte der Autobahn und vertikal die Höhe über dem Meeresspiegel aufgetragen. In der unteren und mittleren Abbildung sind die Windverhältnisse bei einer Verfüllung von Garzweiler I allein bzw. Garzweiler I & II zu einem Endzustand zu sehen. Die Unterschiede sind sehr gering.

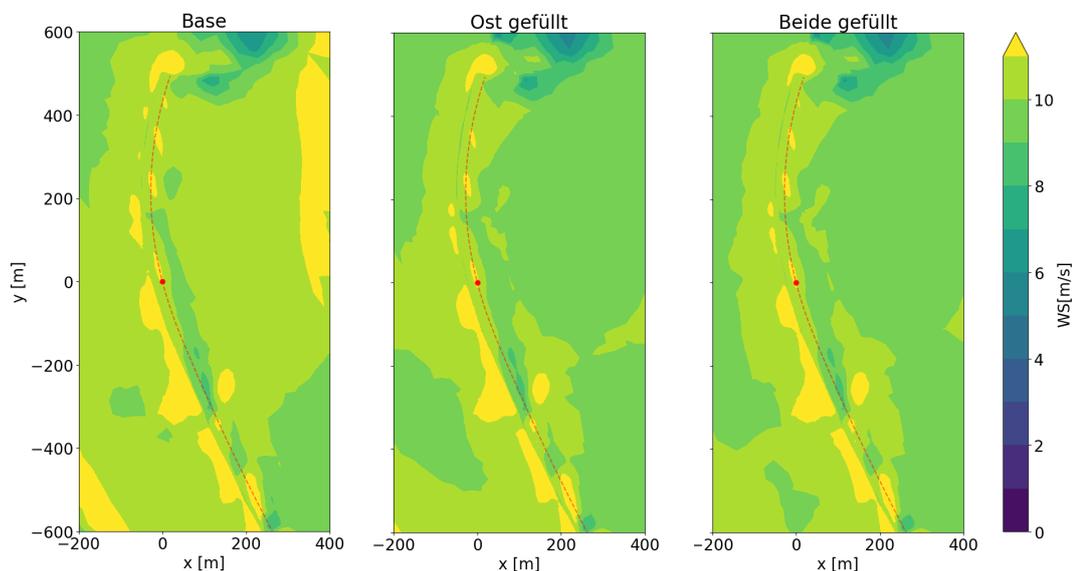


Abbildung 3.7 zeigt Windgeschwindigkeit im Gelände über der Autobahn mit und ohne Verfüllung der Gruben in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche. Die Windgeschwindigkeiten sind in farblichen Konturen dargestellt: Jede Farbe stellt eine Abstufung um 1 m/s dar. Die X-Achse stellt die Ost-West-Richtung in Metern dar, die Y-Achse die Nord-Süd-Richtung, jeweils mit dem Ursprung an der Unfallstelle. Die linke Abbildung zeigt den simulierten Wind im Fall des Zustandes der Gruben zum Zeitpunkt des Unfalls am 21.10.21 (Base). In der Mitte und rechts sind die Windgeschwindigkeiten bei einer Verfüllung von Garzweiler I allein bzw. Garzweiler I & II zu sehen. Die Unfallstelle ist mit einem Punkt markiert.

ist die Windgeschwindigkeit und rechts die Turbulenzintensität gegen die Höhe aufgetragen. Die Differenzen aus den Simulationen sind marginal. Der Einfluss der unverfüllten Gruben als Löcher auf den Wind an dieser Stelle beschränkt sich also auf die Abwesenheit von Hindernissen, welche die Windgeschwindigkeit in Bodennähe reduzieren.

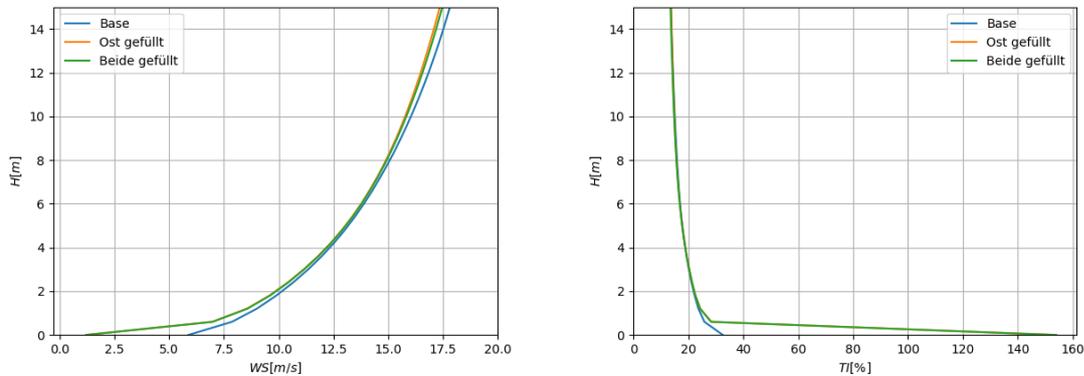


Abbildung 3.8 zeigt die Windgeschwindigkeit (links) und die Turbulenzintensität (rechts) in der Mitte der Autobahn auf Höhe der Unfallstelle vom 21.10.21, um 8:21 Uhr, gegenüber der Höhe über dem Boden aufgetragen. Die Plots zeigen die Grafen der Simulation mit offenen Gruben (Base) und mit verfülltem Garzweiler I Tagebau (Ost gefüllt) und beiden Tagebauen im Endzustand (Beide gefüllt).

3.2.2 Windschutzwand an der Autobahn und AgriPV

Da das Gitter entlang der Autobahn deutlich verfeinert werden musste, wurden die Maßnahmen nur im Bereich von 2 km um die Unfallstellen implementiert, um den Effekt zu untersuchen. Auch wenn die Orte der Konstruktionen sich zwischen den Wandbauten direkt an der Autobahn von dem Ansatz der AgriPV unterscheiden, so sind die Ergebnisse hier doch zusammengefasst, um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen. Diskutiert werden hier die auftretenden Windgeschwindigkeiten bzw. Windgeschwindigkeitsreduzierungen durch die Maßnahmen in einer Höhe bis zu 4 m über dem Boden im Bereich der Autobahn, da ein wesentlicher Teil der Fahrzeuge niedriger als diese Höhe ist.

Aus der Simulation lässt sich ein detailliertes Bild ableiten, wie die Strömung sich an einer Wand verhält. Dies ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Strömung wird dabei direkt oberhalb der Wand erheblich beschleunigt. Im Nachlauf der Wand kommt es dann zu einer Abwärtsströmung und einem Wirbel, der aber von den Windgeschwindigkeiten deutlich geringer als die Ursprungsgeschwindigkeit ausfällt. Auf der Höhe der Wand selbst kommt es, im Nachlauf der Wand zu einem Gebiet, in dem die Geschwindigkeit reduziert ist.

Abbildung 3.10 zeigt nun die Reduktion der Windgeschwindigkeiten durch die verschiedenen Maßnahmen am Unfallort und zum Vergleich die Basis-Variante 0 (Base) ohne Maßnahmen vom Unfall am vom 21.10.21. Die x-Koordinate ist dabei mit dem Ursprung in der Mitte der Autobahn in m dargestellt. Dabei wird deutlich, dass das Szenario des Baus von AgriPV Anlagen keine deutliche Verbesserung im Bereich der Autobahn erzeugt. Der reduzierende Effekt auf die Windgeschwindigkeit ist zu lokal und zudem vor dem Damm an der Autobahn, so dass eine Reduktion auf der Autobahn nur minimal scheint. Der stärkste Effekt wird hingegen durch die Windschutzwand von einer Höhe mit 4 m erzielt.

Wenn die Verteilungen der Windgeschwindigkeit in der Fläche entlang des Autobahnabschnitts in 2 m Höhe in Abbildung 3.11 betrachtet werden, bestätigt sich dies noch einmal. Es wird deutlich, dass der AgriPV Ansatz zu geringe Reduktionswerte aufweist. Die drei anderen Ansätze zeigen

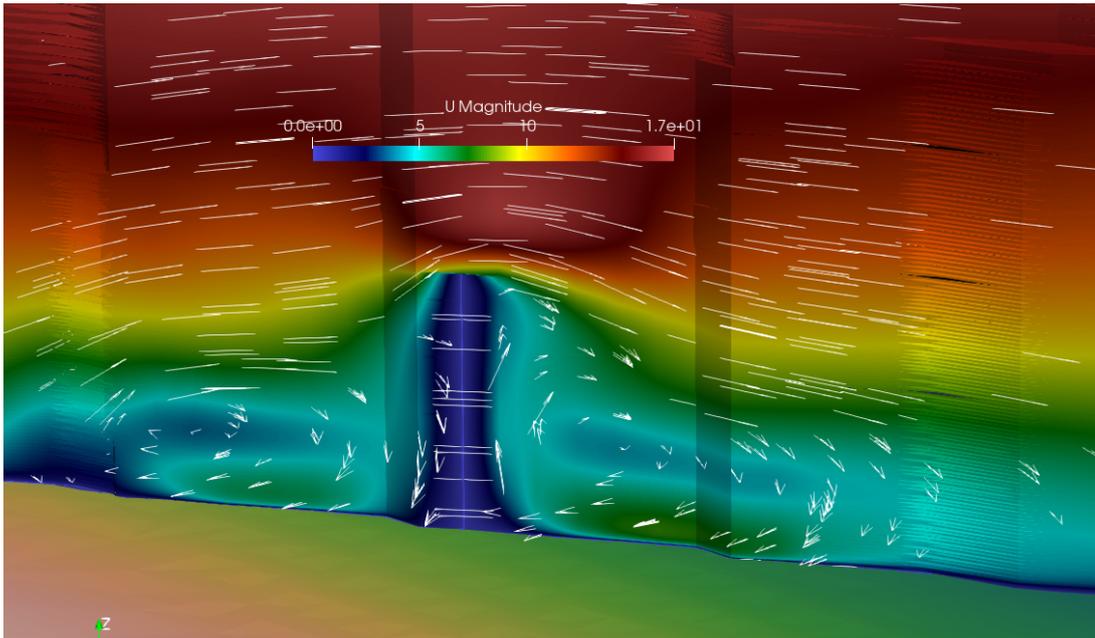


Abbildung 3.9 stellt Stromlinien und Windgeschwindigkeit in der Simulation direkt an einer Wand mit 4 m Höhe dar. Einerseits tritt ein Wirbel hinter der Wand auf, bei deutlich reduzierter Windgeschwindigkeit, andererseits beschleunigt sich der Wind direkt über der Wand stark. Doch ist der Effekt der Beschleunigung ist nur lokal, so dass die Geschwindigkeit im Nachlauf auf Wandhöhe reduziert ist.

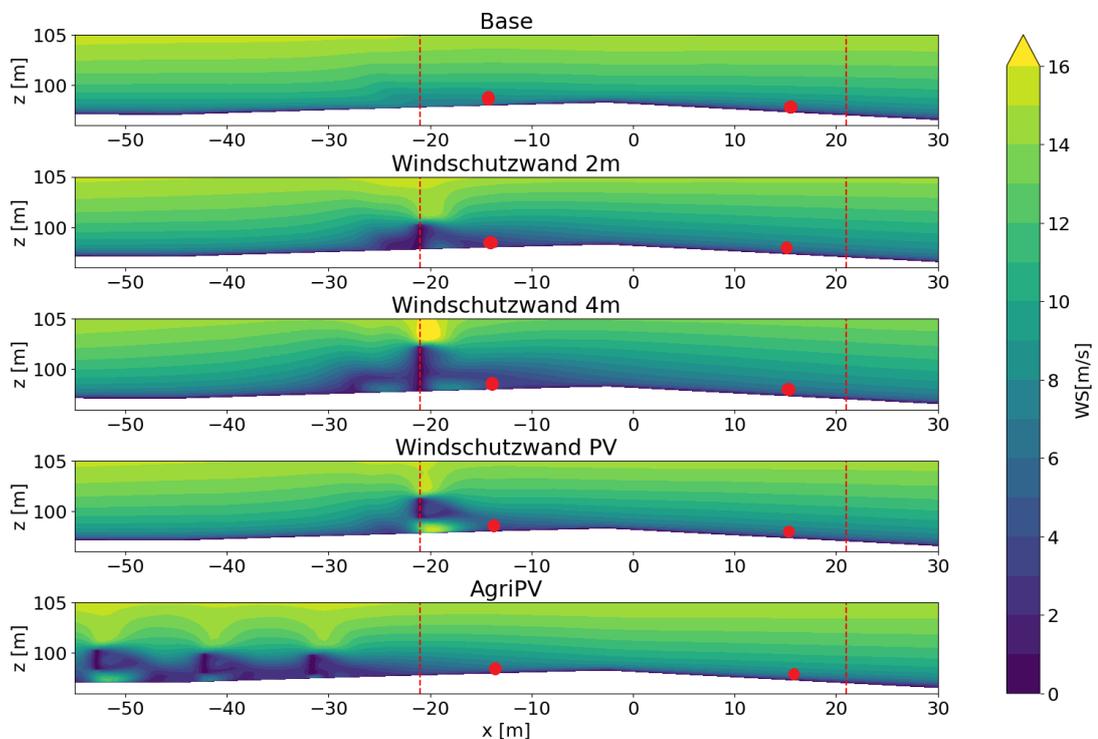


Abbildung 3.10 zeigt vertikale Schnitte des Windprofils hinter den verschiedenen Reduktionsmaßnahmen gegenüber dem Profil ohne Maßnahme am Unfallort. Der Punkt bei $x = 0$ m liegt in der Mitte der Autobahn.

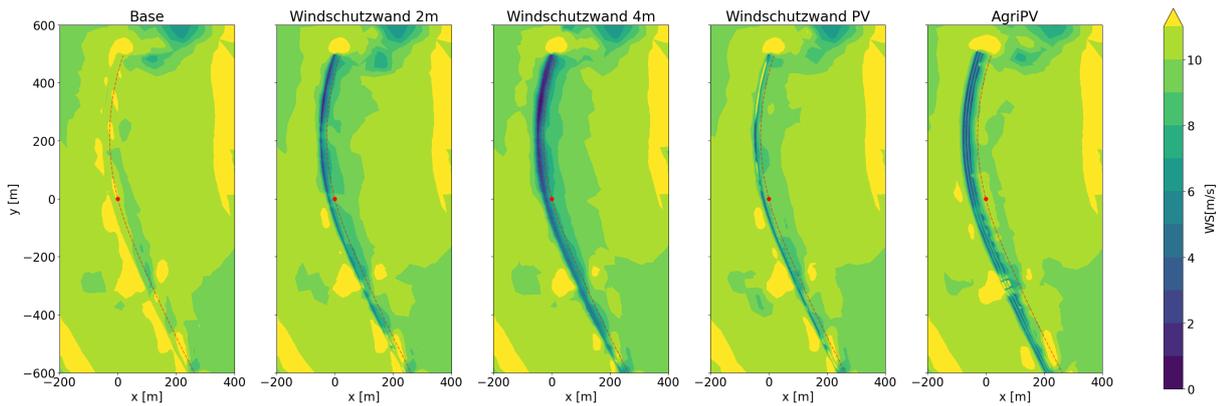


Abbildung 3.11 bildet die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über dem Boden bei verschiedenen Reduktionsmaßnahmen gegenüber der Simulation ohne solche Maßnahmen ab. Der Unfallort ist mit einem Punkt markiert am 0-Punkt der Achsen.

gegenüber der genannten Basis-Variante deutliche Geschwindigkeitsreduktionen am Unfallort, der mit einem Punkt markiert ist.

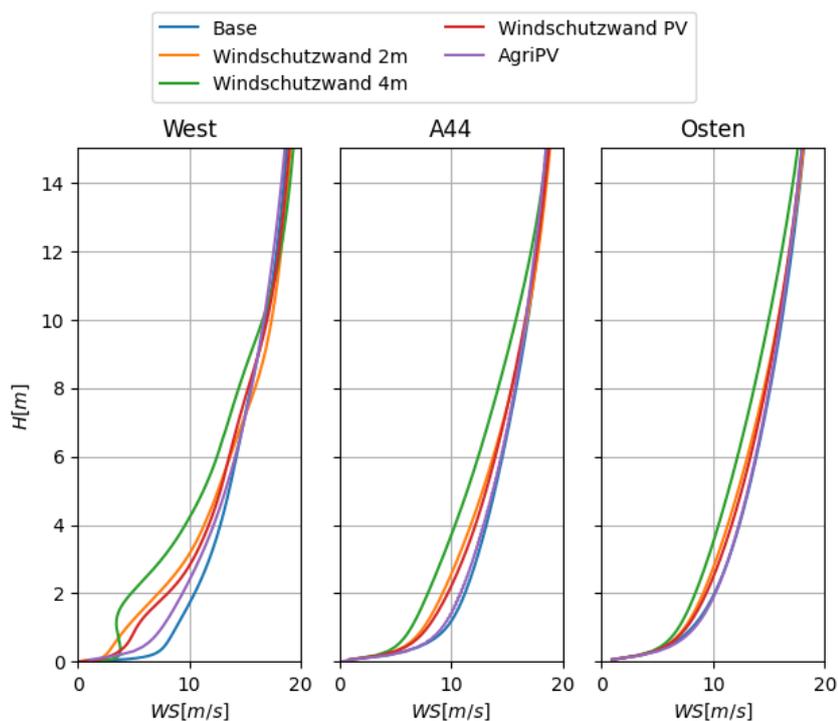


Abbildung 3.12 Quantitative Windgeschwindigkeit in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante - hier Base genannt - vom Unfall am 21.10.2021, um 08:21 Uhr, in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).

Zur quantitativen Verdeutlichung der Reduktionen der Windgeschwindigkeit wurden vertikale Profile der Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität an den roten Punkten in der Abbildung 2.8, Abbildung 3.6 und Abbildung 3.10, sowie in der Mitte der Autobahn am Referenzpunkt des Unfalls vom 21.10.21, um 08:21, aufgenommen. Die Windgeschwindigkeitsprofile in Abbildung 3.12 zeigen die Windgeschwindigkeit in der Höhe von den verschiedenen Simulationen an diesem Ort. Die als "Base" bezeichnete Simulation entspricht dem Verlauf ohne Maßnahmen, so wie er beim Unfallzeitpunkt gewesen sein müsste. Dabei verringert sich die Windgeschwindigkeit auch ohne

Maßnahme von der Mitte der Autobahn hin zum östlichsten Fahrbahnrand leicht. Es wird deutlich, dass die Reduktion durch die AgriPV am geringsten ist. Aus 3.13 ergibt sich, dass zudem die Turbulenzintensität durch alle Maßnahmen erhöht wird. Das bedeutet, dass die Schwankungen der Windgeschwindigkeit gegenüber der mittleren Windgeschwindigkeit zunimmt. Eine Zunahme in TI kann also durch eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit bei gleicher Schwankungsstärke aber auch durch eine Zunahme der Schwankungen verursacht sein. Es verwundert daher nicht, dass die TI durch die Maßnahmen zunimmt. Da die Wirkung der Wände am stärksten in ihrer unmittelbaren Nähe sind, hier aber möglichst konservativ abgeschätzt werden soll, beschränken wir uns in der Diskussion auf die Auswertung der Ergebnisse in der Mitte und am östlichen Rand der Autobahn. Die Ergebnisse auf der westlichsten Fahrbahn sind der Vollständigkeit halber mit dargestellt.

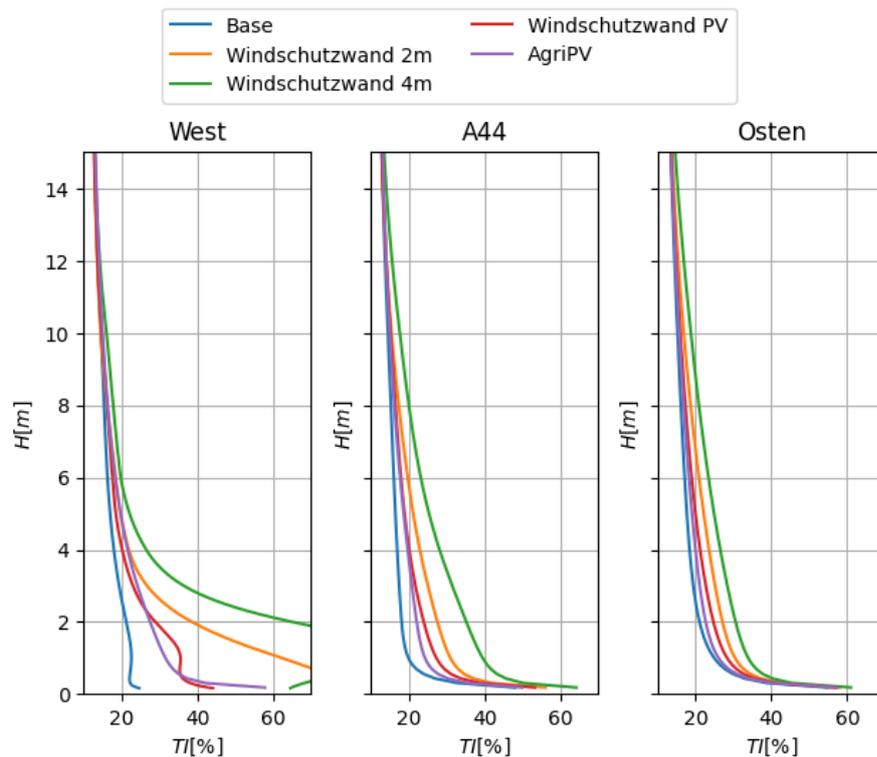


Abbildung 3.13 zeigt das quantitative Profil der TI in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen gegenüber dem Basis-Variante - hier Base - am 21.10.2021 in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).

Wie in Abbildung 3.12 zu sehen ist, reduziert eine 4 m hohe Windschutzwand die mittleren Windgeschwindigkeiten in der Mitte der Autobahn in diesem Fall um mehr als 3,5 m/s auf 2 m Höhe. Diese Reduktion bleibt bis zu einer Höhe von 4 m nahezu konstant. Damit ist es in Bezug auf die mittleren Windgeschwindigkeiten die wirksamste Maßnahme. Auf der östlichsten Fahrbahn beträgt die Reduktion nur noch 1,8 m/s auf 2 m Höhe, nimmt aber mit zunehmender Höhe auf 1,9 m/s in 4 m Höhe zu. Gleichzeitig nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit von der Mitte der Autobahn nach Ost auch tendenziell ohne Maßnahme ab. Dies führt dazu, dass die mittlere Windgeschwindigkeit in 4 m Höhe bei einer Windschutzwand von 2 m Höhe mit 9 m/s in der Mitte und an der östlichsten Fahrbahn nahezu konstant ist. Allerdings wird in Abbildung 3.13 deutlich, dass durch die Verwirbelungen hinter der Wand die Turbulenzintensität am stärksten steigt.

Der Bau einer 2 m hohen Windschutzwand reduziert den Wind in der Mitte der Autobahn in 2 m Höhe um ca. 2 m/s und in 4 m Höhe noch immer um über 1,5 m/s, wie auch in Abbildung 3.12 erkennbar ist. Am östlichen Fahrstreifen liegen die Reduktionen jeweils mit 1 m/s in 2 und 4 m

Höhe zwar geringer, wegen der geringeren ursprünglichen Windgeschwindigkeit ist der Wind dort genauso stark wie in der Mitte. Die Maßnahme wirkt auf die mittleren Windgeschwindigkeiten in der Mitte der Autobahn ähnlich, wie eine 4 m Wand, jedoch nicht so stark. Die Turbulenzintensitätszunahme fällt in 3.13 dafür nicht so stark aus. Im Vergleich zur 4 m Wand nimmt die TI in der Mitte der Autobahn nur halb so stark zu.

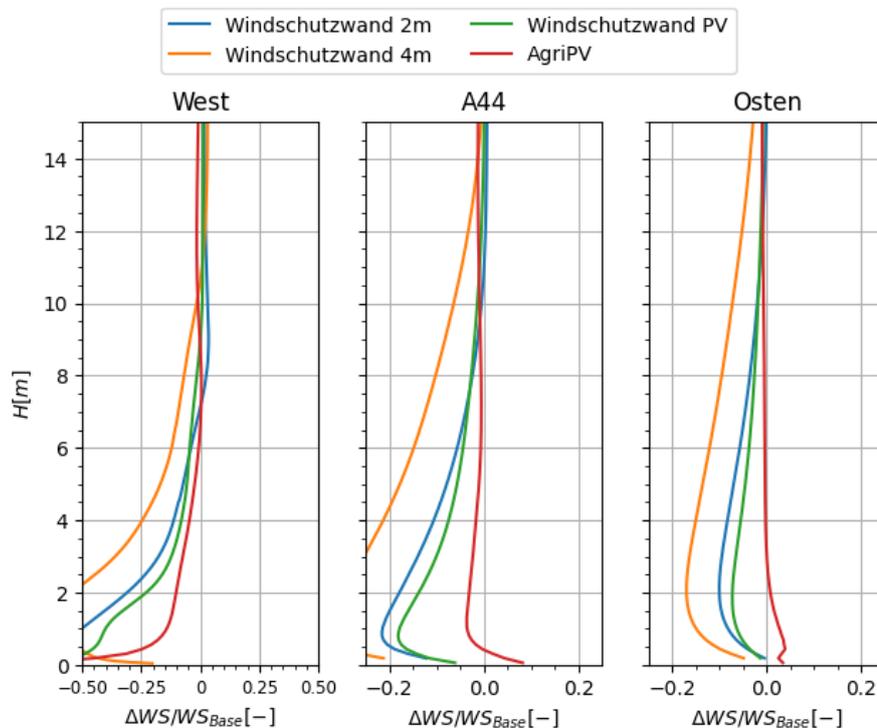


Abbildung 3.14 bildet die relative Reduktion der Windgeschwindigkeit mit der Höhe durch die verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante 0 des Unfalls vom 21.10.2021 ohne Maßnahmen in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph) ab.

Die Wand aus Solarpanelen hätte eine Höhe von 3 m, wäre aber bis zu einer Höhe von 1 m durchlässig. Solch eine Wand wirkt sich in den Simulationen etwas weniger stark als die 2 m Wand auf die mittlere Windgeschwindigkeit aus. Insgesamt liegt in diesem Fall in der Mitte der Autobahn bei einer Höhe von 4 m die Reduktion etwa bei ca. 1 m/s. Dafür fällt aber auch die TI in diesen Höhen ca. 4 % geringer aus als bei einer 2 m Wand und liegt mit 20 % nur noch 4 % über dem Wert ohne Maßnahme. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass sich die Wirksamkeit durch einen flachen Pflanzenbewuchs im unteren freien Meter der Solarpanelen noch verbessern lässt. Dies wurde jedoch nicht mehr untersucht.

Auf der Wind abgewandten, östlichen Seite der Autobahn lässt der Effekt der Maßnahmen eher nach, so dass die Reduktion in 2 m Höhe zwischen 1,8 m/s bei der 4 m hohen Wand liegt. Allerdings hielt sich der Effekt der Solarpanelen-Wand nahezu konstant vom mittleren bis zum östlichen Auswertepunkt. Bemerkenswert ist, dass die Wirksamkeit auf der östlichsten Fahrspur bis zu der Höhe von 4 m Höhe etwas zunimmt. Die AgriPV Maßnahme zeigt in dem hier diskutierten Bereich kaum positiven Effekt. Es scheint so zu sein, dass die Reduktion durch die AgriPV Maßnahme zu weit nach oben gedrückt wird, so dass eine nennenswerte Reduktion im Bereich der Fahrzeuge nicht erreicht wird.

Um deutlich zu machen, wie stark eine Reduktion der Windgeschwindigkeit im Vergleich zum Unfallszenario durch die jeweiligen Maßnahmen ausfällt, ist in Abbildung 3.14 die Windgeschwindig-

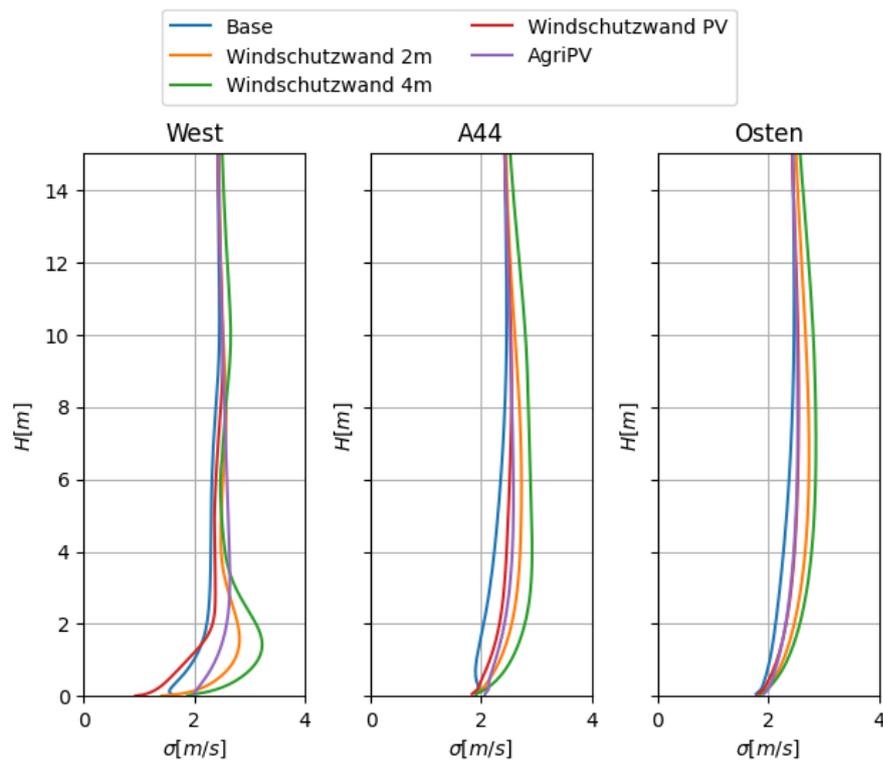


Abbildung 3.15 zeigt die Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeit als Indikator für die quantitative Turbulenz im Vergleich der Maßnahmen und der Basis-Variante 0 für den Unfall vom 21.10.2021 in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).

keit gegen die Höhe im Verhältnis zu der Simulation ohne Maßnahme dargestellt. Es wird deutlich, dass der Wind durch die verschiedenen Windschutzwände in der Mitte der Fahrbahn in 2 m Höhe um 13 bis 35% reduziert wird, wobei der AgriPV Ansatz hier wegen fehlender Wirksamkeit nicht weiter diskutiert wird. Mit zunehmender Höhe reduzieren sich die Werte auf 8 bis 22 %. Am östlichen Auswertepunkt verändert sich der Effekt dann auf 8 bis 18 % in 2 m Höhe. Da eine Reduktion der Windgeschwindigkeit durch eine mögliche Zunahme der Turbulenz aufgehoben werden könnte, ist der σ Wert, also der Wert der Schwankung der Windgeschwindigkeit, der 67% aller Schwankungen erfasst, in Abbildung 3.15 in m/s dargestellt. Auch hier wird deutlich, dass die Zunahme der Turbulenz kaum zu höheren Windgeschwindigkeiten führt, da die Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeiten größer ist als die wahrscheinlichen Windgeschwindigkeitsschwankungen der Turbulenz.

Zur Verifikation des Ergebnisses wurde zusätzlich die Variante 0 des Unfalls vom 28.1.2020, um 13:35 Uhr, untersucht. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 zeigen die Windgeschwindigkeit bzw. die TI in der Mitte der Autobahn. Da an dem Tag die Windgeschwindigkeit etwas geringer ausfiel, sind die absoluten Reduktionen der Windgeschwindigkeit auch geringer.

Auch in diesem Fall wurde noch die relative Reduktion der Windgeschwindigkeit in Abbildung 3.18 ausgewertet. Werden die relativen Reduktionen betrachtet, ergeben sich ähnliche Werte wie in der Situation am 21.10.2021, auch wenn die Bilanz der AgriPV nicht ganz so negativ ausfällt. Allerdings war in dem Fall auch die Basisgeschwindigkeit ohne Maßnahmen niedriger. Trotzdem bleibt die Wirksamkeit des AgriPV-Ansatzes auf einem sehr niedrigen Niveau. Im Fall der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit durch die Turbulenz ist das Ergebnis auch sehr ähnlich dem der Variante des Unfalls vom 21.10.2021, wie aus Abbildung 3.19 zu entnehmen ist.

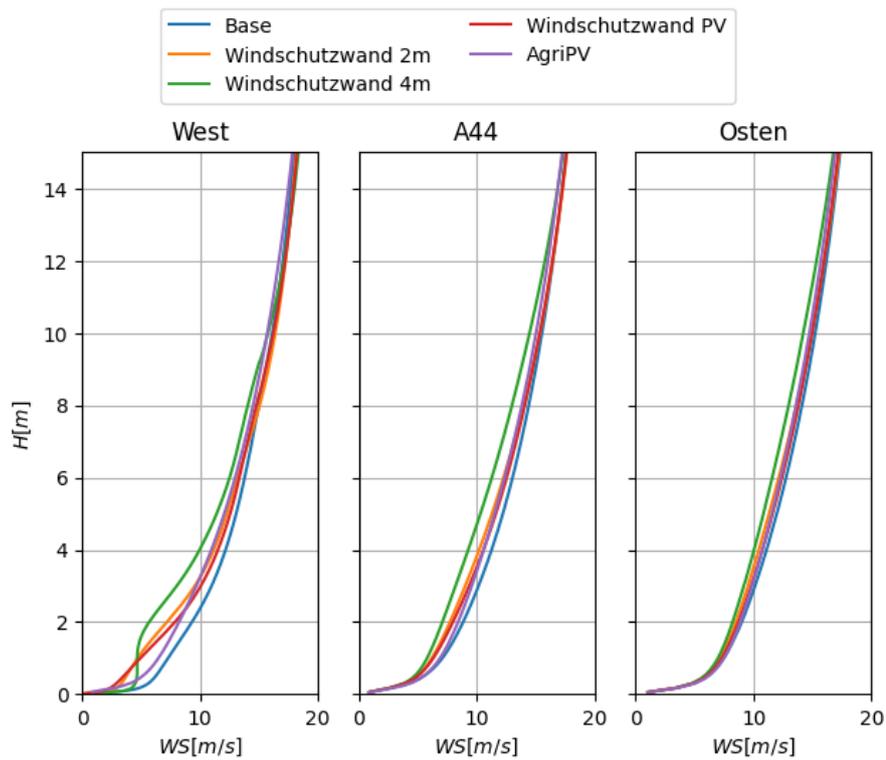


Abbildung 3.16 zeigt die absoluten Windgeschwindigkeitsprofile in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen zum Zeitpunkt des Unfalls vom 28.1.2020 entsprechend der Basis-Variante 0 - hier als Base bezeichnet.

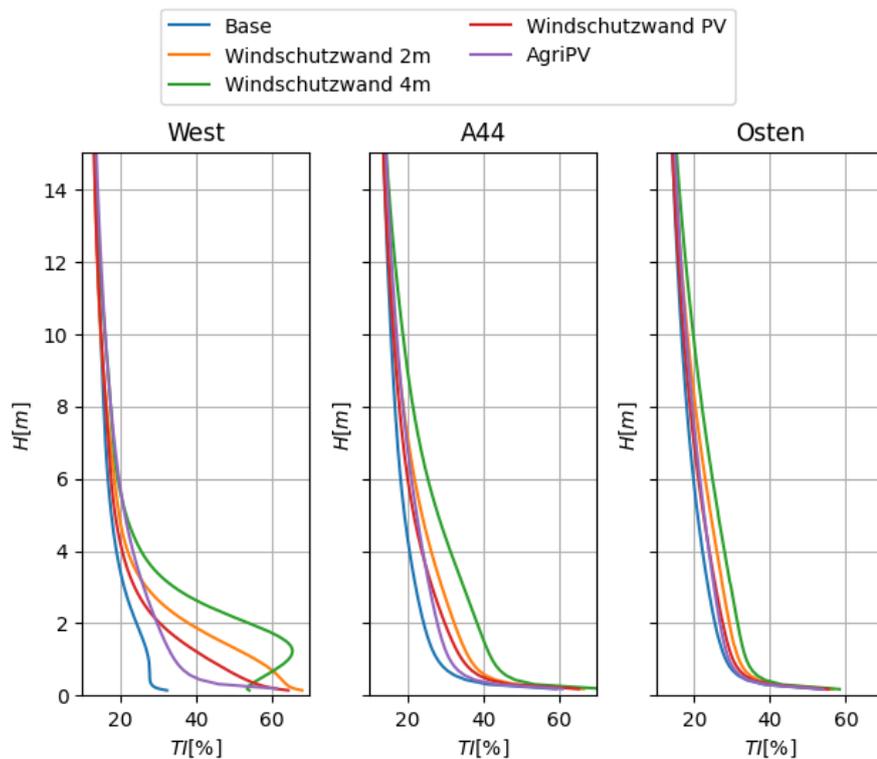


Abbildung 3.17 zeigt die TI in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen zum Zeitpunkt des Unfalls vom 28.1.2020 entsprechend der Basis-Variante 0 - hier als Base bezeichnet.

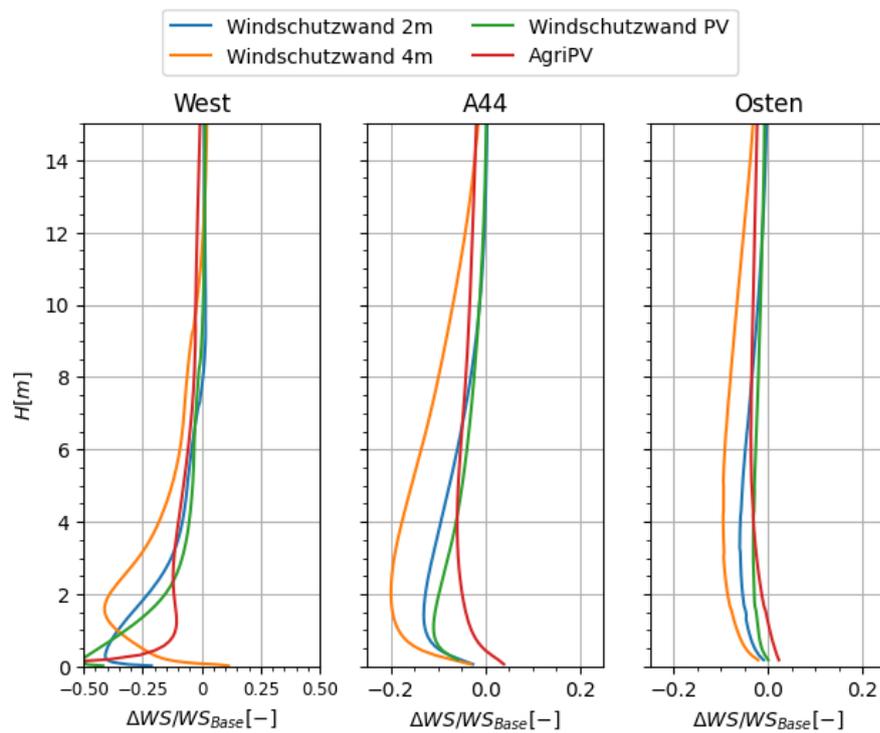


Abbildung 3.18 bildet die relative Reduktion der Windgeschwindigkeit mit der Höhe durch die verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante 0 des Unfalls vom 28.1.2020 ohne Maßnahmen ab.

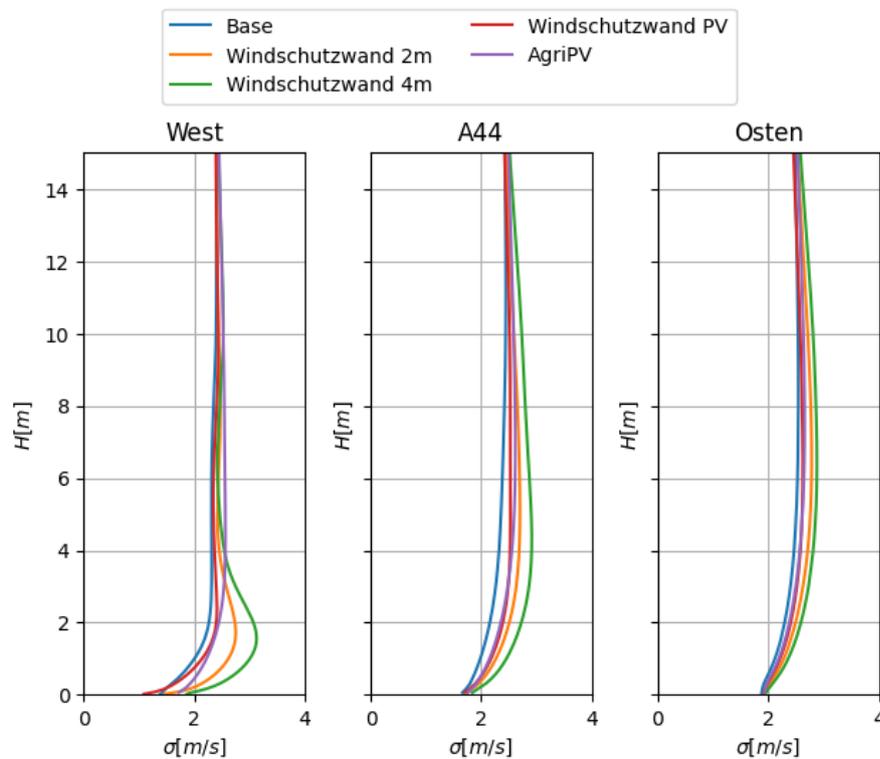


Abbildung 3.19 zeigt die Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeit als Indikator für die quantitative Turbulenz im Vergleich der Maßnahmen und der Basis-Variante 0 für den Unfall vom 28.1.2020.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden die Windverhältnisse an der Autobahn A44 im Bereich zwischen den Tagebauten Garzweiler I und Garzweiler II untersucht, da es in diesem Abschnitt vermehrt zu Unfällen gekommen ist, die durch Wind zumindest mitverursacht wurden. Zu diesem Zweck wurden CFD-Simulationen mit der RANS-Methode durchgeführt, um die Strömungsverhältnisse des Windes im Bereich der Tagebauten zu erfassen. Orientiert wurde sich in der Untersuchung an zwei Unfällen, die bei besonders starken Windbedingungen auftraten. Dabei wurde eine Vielzahl von Szenarien betrachtet, um den Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die Strömungsverhältnisse zu erfassen.

Es stellte sich heraus, dass der Einfluss der Tagebaugruben auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit nur in sofern gegeben ist, dass es durch den Tagebau über mehrere Kilometer Strecke keine Hindernisse in Bodennähe westlich der Autobahn gibt. Eine vertikale Ablösung der Windströmung an den Böschungskanten der Tagebauten und starke Verwirbelungen dadurch, welche einen Einfluss auf die Strecke der Autobahn gehabt hätten, wurden nicht gefunden. Allerdings waren die Windgeschwindigkeiten durch die Abwesenheit von sonstigem Schutz in den betrachteten Fällen erheblich und vermutlich deshalb auch unfallverursachend. Der Grund, dass die Unfälle genau in diesem Abschnitt auftraten lag also darin, dass durch die freie Anströmung in diesem Abschnitt der A44 mehr seitlicher Wind vorhanden war, als in anderen Abschnitten von Autobahnen in der Umgebung. Da die A44 zudem etwas geschwungen verläuft, ist der Ort in dem die stärkste seitliche Anströmung vorhanden ist, von der Windrichtung abhängig. Die untersuchten Unfälle traten in einer Biegung auf. Bei den untersuchten westlichen Winden durchfuhren die Fahrzeuge einen Wind der zeitweise annähernd orthogonal von der Seite kam. Zudem verläuft die Autobahn an dieser Stelle auf einem Damm, der den Wind oberhalb der Fahrbahn noch etwas beschleunigt.

Vor diesem Hintergrund zeigte sich auch, dass das Verfüllen der Gruben Garzweiler I im ersten Schritt und Garzweiler I und II im Zweiten keine wirksamen Veränderungen für die Windverhältnisse an der Autobahn bewirkten. Da die Rekultivierung von Garzweiler II als See geplant wird, d.h. mit einer sehr geringen Oberflächenrauigkeit und ohne Baumbewuchs, die Windrichtung der untersuchten Unfälle aber genau aus dieser Richtung kam, ist eine Veränderung des Windes in dem untersuchten Szenario nicht zu erwarten.

Als Maßnahme gegen die Unfälle wurden deshalb Möglichkeiten zur technischen Abschirmung des Windes von der Autobahn mit Hilfe von CFD Simulationen untersucht. Als wirksame Maßnahme zeigten sich dabei Windschutzwände, die direkt neben der Autobahn entlang der Strecke gebaut werden. Betrachtet wurden Wände mit einer Höhe von 2 und 4 m, sowie eine Solar-Wand aus Photovoltaik-Modulen, welche einen Meter über dem Boden auf eine Höhe von 3 m aufgeständert werden. Diese Wände reduzierten die Windgeschwindigkeit über die gesamte Breite der Autobahn. Auf der östlichsten Fahrbahn der Autobahn, also der Fahrbahn mit größtem Abstand zur Maßnahme, betragen die Reduktionen im Unfallszenario vom 21.10.2021 in 2 m Höhe 0,8 – 1,8 m/s, was 8 – 18 % der Gesamtgeschwindigkeit des Windes in dieser Höhe entsprach. Selbst in 4 m Höhe betrug die Reduktion noch 0,7 – 1,9 m/s bei einer freien Windgeschwindigkeit von 24,5 m/s in einer Höhe von 100 m. Dies entsprach noch immer einer Reduktion von 6 – 15 % der Windgeschwindigkeit. Trotz einer Zunahme an Turbulenz durch diese Maßnahmen, bleibt die Windgeschwindigkeit auch im turbulenteren Wind inklusive der Turbulenz unter jener der freien Anströmung.

Auch untersucht, aber nicht hinreichend wirksam gegen den Wind, war die Installation von AgriPV-Anlagen auf den Feldern westlich der Autobahn. Es wurden drei Reihen dieser Anlagen westlich der Autobahn simuliert, der Effekt auf der Autobahn selbst fiel aber sehr gering aus. Dies lag zum Einen an der deutlich größeren Distanz zur Autobahn, zum Anderen daran, dass die Autobahn in dem untersuchten Abschnitt auf einem Damm verläuft. Dadurch wurde insgesamt die Reduktion des Windes bei dieser Maßnahme über die Distanz auf eine zu große Höhe gedrückt, so dass auf

Höhe der Fahrzeuge der Effekt zu niedrig ausfiel. Deshalb wird zur Vermeidung von zu hohen Windgeschwindigkeiten auf dem betroffenen Abschnitt der A44 empfohlen, eine Art Windschutzwand direkt entlang der Autobahn zu bauen.

5 Literaturverzeichnis

- Akbarzadeh, Siamak u. a. (2019). „Adjoint-based calibration of inlet boundary condition for atmospheric computational fluid dynamics solvers“. In: *Wind Energy Science* 4.4, S. 619–632.
- Chang, Chi-Yao u. a. (2018). „A consistent steady state CFD simulation method for stratified atmospheric boundary layer flows“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 172, S. 55–67.
- Google (2023). **Google-Maps**. Online Ressource, <https://www.google.de/maps/@51.0674844,6.4812273,7058m/data=!3m1!1e3>, letzter Abruf 3.02.2023.
- Jasak, Hrvoje (2009). „OpenFOAM: open source CFD in research and industry“. In: *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 1.2, S. 89–94.
- Ludwig, Dipl.-Ing Jan (2016). *Unfallgeschehen mit Lkw-Beteiligung unter Berücksichtigung von Leicht-Lkw-Kombinationen*. Techn. Ber.
- Next2Sun Konzept für AgriSolar-Anlagen* (2022). Online Ressource vom 20.11.2022. <https://next2sun.com/>, letzter Aufruf: 30.01.2023.
- Schmidt, Jonas, Carlos Peralta und Bernhard Stoevesandt (2012). „Automated generation of structured meshes for wind energy applications“. In: *Open Source CFD International Conference, London*.

6 Abkürzungen

AgriPV	landwirtschaftliche Photovoltaik
CFD	Computational Fluid Dynamics
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
h	Stunde
IWES	Institut für Windenergiesysteme
km	Kilometer
km²	Quadratkilometer
m	Meter
Pol	Points of Interest (Wichtige Punkte in der Simulation, die ggf. ausgewertet werden)
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
TI	Turbulenzintensität
s	Sekunde
WTG	Windenergieanlage

Abbildungsverzeichnis

1.1	Satelliten Aufnahme der Tagebauflächen aus Google-Maps zeigt die beiden Tagebaue Garzweiler II links der A44 und Garzweiler I rechts davon, der gerade aufgeschüttet wird, mit der Autobahn in der Mitte von Nord Richtung Süd bis Südsüdost führend (Google, 2023).	7
2.1	Abschnitte in denen es zu Unfällen kam, die mit Wind im Zusammenhang standen.	9
2.2	Betrachtete Unfallorte, Messstationen und Standorte der Windenergieanlagen aus denen Daten zur Windanalyse bezogen wurden.	10
2.3	Das Gelände, welches in der Simulation mit einbezogen wurde. Die Farbgebung entspricht der oberflächennahen Windgeschwindigkeit. Die Tagebaugruben sind darin deutlich zu erkennen.	11
2.4	Das Gitter in der horizontalen Auflösung im Bereich der Tagebaugruben und der Autobahn, die dazwischen zum Teil auf einem Damm verläuft.	13
2.5	Horizontale Aufsicht auf den Boden des Rechengitters der Simulation mit hinreichender Auflösung der Windschutzwand, mit einer Verfeinerung im Bereich der Autobahn mit der Wand und einem größeren Gitter in größerer Entfernung.	13
2.6	Das Gelände des Tagebaus mit verfüllter Grube von Garzweiler I.	15
2.7	Das Gelände des Tagebaus mit verfüllter Grube von Garzweiler I sowie des verfüllten Tagebaus Garzweiler II mit einem See.	16
2.8	Positionierung der Windschutzwand entlang der Autobahn, hinter der Schutzeinrichtung, aber auf der Böschung der Autobahn. Die Solarwände auf den Feldern als AgriPV ist links von der Autobahn exemplarisch eingezeichnet (Zeichnung zur Verfügung gestellt von RWE). Die roten Punkte kennzeichnen westliche und östliche Standorte auf der Autobahn, an denen vertikale Geschwindigkeitsprofile in Abschnitt 3.2.2 ausgewertet wurden.	17
3.1	Punkte mit markierten Streckenkilometern entlang der Autobahn, die in der Simulation ausgewertet wurden.	19
3.2	Geschwindigkeit des Windes jeweils in 2 m Höhe über dem Boden. Die Farben entsprechen den jeweiligen Windgeschwindigkeiten bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die Punkte stellen Unfallstellen auf der Autobahn dar. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation.	20
3.3	bildet die Veränderung der Richtung des Windes in 2 m über dem Gelände gegenüber dem von außen einströmenden Wind ab. Die Farben entsprechen den jeweiligen Veränderungen der Windrichtung in Grad gegenüber den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation.	21
3.4	Zeigt die Geschwindigkeit des vertikalen Windes in 2 m über dem Gelände. Die Farben entsprechen den jeweiligen Windgeschwindigkeiten des Windes in vertikaler Richtung bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation. Da die Grundrichtung des Windes horizontal ist, sind diese Winde durch das Gelände verursacht. Ein Einfluss des Tagebaus auf den Bereich der Autobahn ist nicht zu erkennen.	21
3.5	Zeigt die Turbulenzintensität des Windes in 2 m über dem Gelände. Die Farben entsprechen der jeweiligen Turbulenzintensität bei den jeweiligen Richtungen des einströmenden Windes. Die schwarzen Pfeile zeigen die Hauptwindrichtung der jeweiligen Simulation. Es wird deutlich, dass die TI sehr lokal an den Steigungen im Gelände erhöht ist. Eine erhöhte Turbulenz an der Autobahn durch die Böschungskanten des Tagebaus ist nicht zu erkennen.	22

3.6	stellt die Windgeschwindigkeit im Gelände über der Autobahn mit und ohne Verfüllung der Gruben in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche dar. Die obere Abbildung zeigt farblich die Windgeschwindigkeit an der Autobahn im Fall der Simulation des Zustandes der Gruben während des Unfalls am 21.10.21 (Base). Es ist horizontal der Abstand in Metern von der Mitte der Autobahn und vertikal die Höhe über dem Meeresspiegel aufgetragen. In der unteren und mittleren Abbildung sind die Windverhältnisse bei einer Verfüllung von Garzweiler I allein bzw. Garzweiler I & II zu einem Endzustand zu sehen. Die Unterschiede sind sehr gering.	23
3.7	zeigt Windgeschwindigkeit im Gelände über der Autobahn mit und ohne Verfüllung der Gruben in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche. Die Windgeschwindigkeiten sind in farblichen Konturen dargestellt: Jede Farbe stellt eine Abstufung um 1 m/s dar. Die X-Achse stellt die Ost-West-Richtung in Metern dar, die Y-Achse die Nord-Süd-Richtung, jeweils mit dem Ursprung an der Unfallstelle. Die linke Abbildung zeigt den simulierten Wind im Fall des Zustandes der Gruben zum Zeitpunkt des Unfalls am 21.10.21 (Base). In der Mitte und rechts sind die Windgeschwindigkeiten bei einer Verfüllung von Garzweiler I allein bzw. Garzweiler I & II zu sehen. Die Unfallstelle ist mit einem Punkt markiert.	23
3.8	zeigt die Windgeschwindigkeit (links) und die Turbulenzintensität (rechts) in der Mitte der Autobahn auf Höhe der Unfallstelle vom 21.10.21, um 8:21 Uhr, gegenüber der Höhe über dem Boden aufgetragen. Die Plots zeigen die Grafen der Simulation mit offenen Gruben (Base) und mit verfülltem Garzweiler I Tagebau (Ost gefüllt) und beiden Tagebauen im Endzustand (Beide gefüllt).	24
3.9	stellt Stromlinien und Windgeschwindigkeit in der Simulation direkt an einer Wand mit 4 m Höhe dar. Einerseits tritt ein Wirbel hinter der Wand auf, bei deutlich reduzierter Windgeschwindigkeit, andererseits beschleunigt sich der Wind direkt über der Wand stark. Doch ist der Effekt der Beschleunigung ist nur lokal, so dass die Geschwindigkeit im Nachlauf auf Wandhöhe reduziert ist.	25
3.10	zeigt vertikale Schnitte des Windprofils hinter den verschiedenen Reduktionsmaßnahmen gegenüber dem Profil ohne Maßnahme am Unfallort. Der Punkt bei $x = 0$ m liegt in der Mitte der Autobahn.	25
3.11	bildet die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe über dem Boden bei verschiedenen Reduktionsmaßnahmen gegenüber der Simulation ohne solche Maßnahmen ab. Der Unfallort ist mit einem Punkt markiert am 0-Punkt der Achsen.	26
3.12	Quantitative Windgeschwindigkeit in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante - hier Base genannt - vom Unfall am 21.10.2021, um 08:21 Uhr, in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).	26
3.13	zeigt das quantitative Profil der TI in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen gegenüber dem Basis-Variante - hier Base - am 21.10.2021 in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).	27
3.14	bildet die relative Reduktion der Windgeschwindigkeit mit der Höhe durch die verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante 0 des Unfalls vom 21.10.2021 ohne Maßnahmen in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph) ab.	28
3.15	zeigt die Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeit als Indikator für die quantitative Turbulenz im Vergleich der Maßnahmen und der Basis-Variante 0 für den Unfall vom 21.10.2021 in der Mitte des westlichsten Fahrstreifens, am östlichen Rand des östlichsten Fahrstreifens und in der Mitte der Autobahn (mittiger Graph).	29

3.16 zeigt die absoluten Windgeschwindigkeitsprofile in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen zum Zeitpunkt des Unfalls vom 28.1.2020 entsprechend der Basis-Variante 0 - hier als Base bezeichnet.	30
3.17 zeigt die TI in der Höhe bei verschiedenen Maßnahmen zum Zeitpunkt des Unfalls vom 28.1.2020 entsprechend der Basis-Variante 0 - hier als Base bezeichnet.	30
3.18 bildet die relative Reduktion der Windgeschwindigkeit mit der Höhe durch die verschiedenen Maßnahmen gegenüber der Basis-Variante 0 des Unfalls vom 28.1.2020 ohne Maßnahmen ab.	31
3.19 zeigt die Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeit als Indikator für die quantitative Turbulenz im Vergleich der Maßnahmen und der Basis-Variante 0 für den Unfall vom 28.1.2020.	31

Tabellenverzeichnis

2.1	Unfälle mit Wind als eine Ursache am Tagebau Garzweiler auf der A44 sowie die Windgeschwindigkeit gemessen zu dem Zeitpunkt an der Station Bunker Ost (siehe Abb. 2.2).	8
2.2	Referenz Windbedingungen, die aus den Messungen zu Zeitpunkten von Unfällen entnommen wurden. Die sich zu Tabelle 2.1 ergebenden Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten werden durch die unterschiedliche Höhe und fehlende Umgebungsbeeinflussung der Messung an der WTG verursacht.	10
2.3	Simulierte Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in 100 m Höhe entsprechend der zwei Unfallzeitpunkte. Es wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung variiert um eine Sensibilität gegenüber möglichen Messungenauigkeiten zu erfassen. Die Variante 0, entspricht den am Unfalltag gemessenen Werten und wird im Weiteren als Basis-Variante bezeichnet.	14