

Lungengängige Quarzstäube und negative Auswirkungen von Sprenggasen: Detektion und Lösungsmöglichkeiten für die Zukunft

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	1
2.1. Projektleitung	1
2.2. Wissenschaftliche Leitung	2
2.3. Grundlagenerhebung aus Messtechnik und Simulation	2
2.4. Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau	5
2.5. Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess	13
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	14
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	14

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die im Fördervertrag zugrundeliegenden Ziele des 2. Forschungsjahres beinhalten neben dem Projektstart zeit- und stationsabhängige Messungen der Quarzstaubkonzentration im Tunnel und arbeitsprozessabhängige Bewetterungsmaßnahmen des 3. AP „Grundlagenerhebung aus Messtechnik und Simulation“ sowie die Düsenuntersuchungen in Laborumgebung des 4. AP „Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau“

Der Projektverlauf wurde von Konsortialmeetings im Beisein aller Projektpartner an unterschiedlichen Standorten begleitet.

Während dem zweiten Forschungsjahr wurden die zeit- und stationsabhängigen Messungen der Quarzstaubkonzentration in der Tunnelluft auf Vortriebs- als auch Instandhaltungsbaustellen der Projektpartner sowie in der Forschungs- und Entwicklungsanlage „Zentrum am Berg“ weitergeführt. So wurde von 12. bis 13.03.2024 am Brenner Basis Tunnel, von 29. bis 30.4. im Arlbergtunnel, ... gemessen. Während den arbeitsprozessabhängigen Messungen auf den Baustellen wurde auch der Einfluss der Bewetterung mit einbezogen. Ebenso wurden Düsenuntersuchungen in Laborbedingungen im Technikum des MCI fortgeführt und ein Prototyp der Sprühnebelanlage angefertigt.

Bestimmungen der Rückstände aus Sprengmittel und Dieselmotoremissionen im Tunnelausbruchsmaterial wurden durchgeführt. Die Daten stammen einerseits aus Archivdaten von Projektpartnern, andererseits wurden an Realbaustellen Proben genommen und am in einem zertifizierten Labor der MUL ausgewertet. Die Ergebnisse wurden beim Meeting am 24.10.2024 in Freistadt präsentiert.

Somit wurden die Ziele des zweiten Forschungsjahres laut Fördervertrag erreicht.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Neben der Vertretung gegenüber der FFG wurden während der Projektlaufzeit die terminliche und kaufmännische Projektkoordination, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den ProjektpartnerInnen, die Partnerkommunikation (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement abgewickelt.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

AP 2 „wissenschaftliche Leitung“ wird von MUL und MCI übernommen. Der Projektverlauf wird von regelmäßigen Konsortialmeetings begleitet. Im zweiten Forschungsjahr zählen dazu die Meetings am 10.04.2024 in Innsbruck bei der MCI in Innsbruck, am 23.4.2024 bei der BBT in Innsbruck, am 11.07.2024 am ZaB der MUL, am 24.09.2024 bei der BEMO in Innsbruck, am 24.10.2024 bei der ÖstuStettin in Freistadt sowie am 17.12.2024 beim ÖBV in Wien.

2.3. Grundlagenerhebung aus Messtechnik und Simulation

Fertigstellungsgrad: 100%

AP 3 „Grundlagenerhebung aus Messtechnik und Simulation“ teilt sich in insgesamt 4 Teilbereiche, von denen 3.1 „Ermittlung der arbeitsprozessabhängigen Quarzstaubkonzentration im zyklischen Vortrieb“ gänzlich und 3.2 „Simulation der Bewetterung und Abgleich mit den Ergebnissen aus der Quarzstaubkonzentration“ zu 50% im ersten Forschungsjahr liegt. Diese AP wurden im zweiten Forschungsjahr weitergeführt, um mehr Daten für einen Datenpool zu schaffen.

3.1 Ermittlung der arbeitsprozessabhängigen Quarzstaubkonzentration im zyklischen Vortrieb (Fertigstellung 90%)

In der Folge des Projektes wurden im 2. Forschungsjahr Staubmessungen während 11 Sprengungen auf verschiedenen Baustellen der Projektpartner wie H53 BBT, Rohbaustollen Angath, FRS Schmittentunnel und Tunnel Vierzehn sowie Messungen bei der Sanierung Arlbergbergtunnel und Tunnelkette Golling A10 durchgeführt. Im Zuge dieser Messungen sind die E-Staub-, A-Staub-, Quarzstaub, Dieselmotoremissionen sowie die NO, NO₂, CO und NH₃ Konzentrationen aufgenommen worden. Am Messaufbau bzw. an den Messgeräten änderte sich im Vergleich zu den vorherigen Messungen nichts. Weiters wurden stationsabhängige Wettermessungen im Vortriebsbereich durchgeführt und die Strömungsgeschwindigkeit in der Lutte bestimmt worden.

Auf der Baustelle sind die Messgeräte, wenn es die örtlichen Gegebenheiten zugelassen haben, an 3 verschiedenen Tunnelmetern aufgestellt worden, um für jede Stationsmessung Ergebnisse zu bekommen und herauszufinden, wie sich die Staubkonzentrationen über die Tunnelmeter ändern. Für alle Messstationen wurden E-Staub und A-Staub Konzentrationen gemessen. Anhand des Zyklusdiagramms konnte man den Staubkonzentrationen Arbeitsschritte zuteilen und erhielt somit eine Staubkonzentrationskurve mit der Messzeit auf der x-Achse und den dazugehörigen Zyklusschritten.

Staubkonzentrationen während des Vortriebs

Während des Tunnelvortriebs kommt es zu erhöhten Staubkonzentrationen besonders nach den Sprengungen und während des Fräsens bzw. Nachprofilierens. Während des Vorgangs des Sprengens bzw. des Zündens entstehen Staub-Aufwirbelungen entlang des Tunnels aufgrund der Erschütterungen und Vibrationen. Diese merkt man an den Messdiagrammen anhand des ersten Peaks. In weiterer Folge wird durch die drückende Bewetterung der Staub entlang des Tunnels von der Ortsbrust weggedrückt und die Staubkonzentrationen werden durch die Frischluftzugabe der Bewetterung verdünnt (Abbildung 2.3.1).

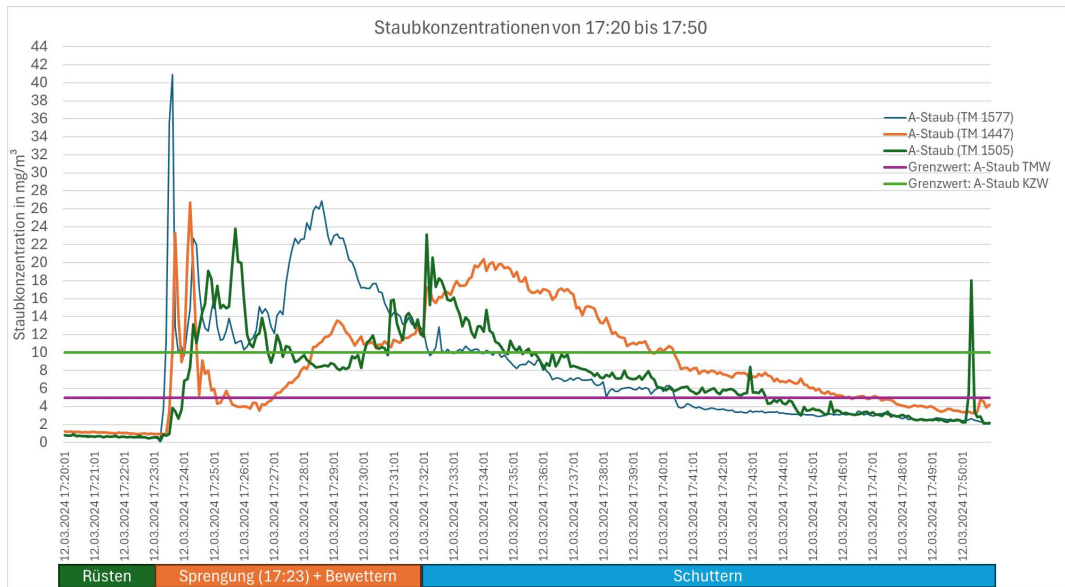


Abbildung 2.3.1: A-Staubkonzentration von 3 Stationen während der Sprengung und des Schütterns

Für die Sanierung der Betonfahrbahn am Arlbergtunnel erfolgte der Abtrag der alten Fahrbahn mittels einer Fräse. Die Messstationen sind daneben auf dem Randweg gestanden. Da das abgetragene Material direkt auf LKW's geladen und wegtransportiert wurde, war dies kein kontinuierlicher Prozess, da es manchmal zu längeren Wartezeiten auf LKW's gekommen ist. Andere Standzeiten waren unter anderem auch Instandsetzungsarbeiten an der Fräse. Die Betonfräse arbeitete in einer langsamen Gehgeschwindigkeit, welches zu großen Fortschritten führte. Eine wichtige Erkenntnis, die durch die Messung gewonnen worden ist, dass beim Fräsen der Betonfahrbahn sehr feiner Staub entsteht, der lungengängig ist. Dies erkennt man an der Abbildung 2.3.2, da die A-Staubkurve und E-Staubkurve fast ident verlaufen.

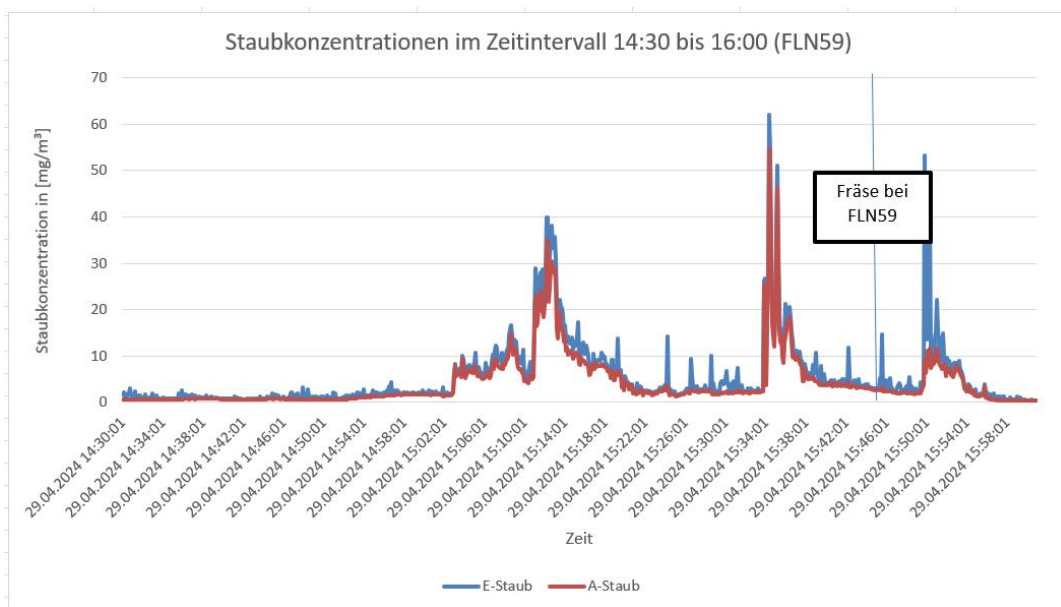


Abbildung 2.3.2: Staubkonzentrationen (FLN59)

3.2 Simulation der Verteilung der Quarzstaubkonzentration in unterschiedlicher Bewetterung (Fertigstellung 90%)

Feinpartikulärer, lungengängiger Staub kann aufgrund seiner geringen Korngröße nur schwer durch Sedimentation abgeschieden werden. Die Effizienz der Staubabsaugung wird maßgeblich durch den

Luftdurchsatz im Lüftungskanal sowie durch den Abstand zwischen dem Lüftungskanal und der Arbeitsfläche beeinflusst. Befindet sich der Lüftungskanal in größerer Entfernung zur Ortsbrust, führt die Rückströmung häufig dazu, dass keine effektive Luftströmung die Ortsbrust erreicht. Daher ist ein präzises Verständnis der Luftströmungsverteilung im Tunnel notwendig, um die Effektivität der Staubentfernung bewerten und optimieren zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen dieses Jahres wurden CFD-Simulationen mithilfe von ANSYS Fluent durchgeführt sowie Luftgeschwindigkeitsmessungen im Tunnel Angath und im Tunnel Zentrum am Berg (ZaB) vorgenommen. Ziel war es, die Strömungsrichtung unter Bedingungen der Zwangsbelüftung zu analysieren, um Ansätze zur Optimierung der Staubabsaugung während des Tunnelbaubetriebes zu entwickeln. Abbildung 2.3.4 zeigt Ergebnisse der Simulation mit Geschwindigkeitsvektoren entlang der Tunnelachse in ZAB tunnel. Abbildung 2.3.5 zeigt die Stromlinie im ZAB-Tunnel zur Beschreibung der effektiven Strömung, die nur bis zum von der Schweizer Norm empfohlenen Abstand 5D angezeigt wird (D ist der äquivalente Durchmesser des Tunnelquerschnitts).

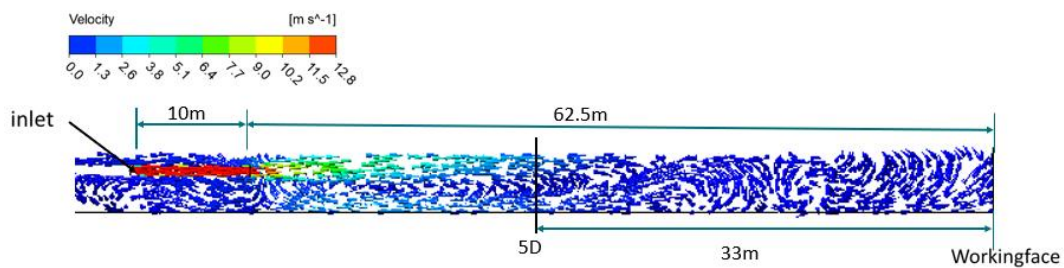


Abbildung 2.3.3: Luftgeschwindigkeitsvektoren im Längenschnitt

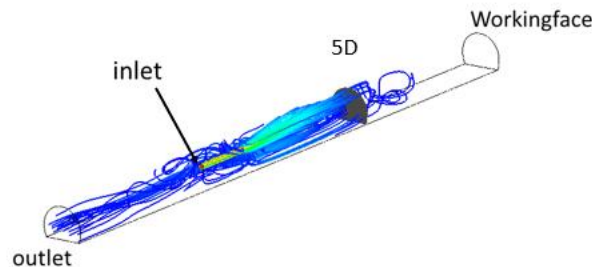


Abbildung 2.3.4: Konturen der Axialgeschwindigkeit für drei Querschnitte

Ort	Feststoff				Ekwat					
	TOC	KW-Index	PAK (16)	PAK (Benz.)	TOC	KW-Index	NH4	NO2-	NO3-	pH - Wert
	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[-]
BBT	n.a.	11,0	n.a.	n.a.	13,0	n.a.	0,95	<0,10	<20,0	9,93
	n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	<10,0	n.a.	1,60	<0,10	<20,0	8,73
	n.a.	<11,0	n.a.	n.a.	12,0	n.a.	1,60	<0,10	33,0	9,77
	2300	14,0	<0,32	<0,020	23,0	<1,0	2,80	<0,10	<20,0	9,71
	n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	26,0	n.a.	1,40	<0,10	<20,0	10,36
	n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	<10,0	n.a.	2,30	<0,10	<20,0	9,69
	<1000	<10,0	<0,32	<0,020	19,0	<1,0	1,90	<0,10	<20,0	9,98
	n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	37,0	n.a.	1,10	<0,10	<20,0	9,24
	n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	<10,0	n.a.	1,10	<0,10	<20,0	9,11
	n.a.	27,0	n.a.	n.a.	13,0	n.a.	1,40	<0,10	<20,0	9,79
n.a.	<10,0	n.a.	n.a.	<10,0	n.a.	1,20	<0,10	<20,0	9,94	
1500	<10,0	<0,32	<0,020	49,0	<1,0	1,60	<0,10	<20,0	9,30	
Limberg III	5000	2700	<0,025	<0,050	50,6	<0,54	3,10	21	490	8,8
Angath*	5080	130	0,046	n.a.	223,0	17	13	<9,2	130	11,6
Angath**	6820	27	0,082	n.a.	311,0	0,99	30,00	<10	11	12,4
Wiener Linien	4860	28	<0,030	n.a.	80,4	<0,50	32,00	<10	<10	11,8
	5390	36	<0,030	n.a.	64,0	<0,50	8,00	<10	<10	10,9
Breitenau	14600	<15	<0,025	n.a.	15,9	<0,5	5,4	<1	57	9,7
	14700	15	<0,025	n.a.	20,6	<0,5	2,2	<1	26	9,9

Abbildung 2.3.5: Ergebnisse der Analyse von Ausbruchmaterial auf Rückstände von DME und Sprengmittel

Figure 5 Abbildung 2.3.5: Konturen der Axialgeschwindigkeit für drei Querschnitte

3.3 und 3.4 Bestimmung der Rückstände von Sprengmittel und DME im Ausbruchsmaterial (Fertigstellung 80%)

Eine klare Trennung der Herkunft der NO_x im Ausbruchsmaterial aus Dieselmotoremissionen (DME) und Sprengmittel ist nicht möglich, da sich deren Abbauprodukte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (anoxisch, oxisch, pH-Wert) bisweilen sofort ineinander umwandeln. Außerdem führt der Prozess der natürlichen Denitrifikation zu einer Reduktion des im Material befindlichen NH_4 und NO_x in elementarem N_2 , welcher in die Umgebungsluft entweicht. Aus diesem Grund wurden neben Messungen von Material aus sowohl Spreng- als auch Baggervortrieben auch von Gewinnungssprengungen in Untertagebauwerken durchgeführt. So soll ein möglicher Unterschied in den Parametern TOC, PAK und KW-Index welche eindeutig den DME zugeschrieben werden können detektiert werden.

In Abbildung 2.3.6 werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt, wobei von Angath 2 Proben genommen wurden. Probe ** wurde direkt nach der Sprengung genommen, während Probe * erst nach einiger Zeit genommen wurde, um eine etwaige Häufung von DMEs zu messen. Weiters zeigt eine grüne Färbung ein Ergebnis unterhalb des Grenzwerts, rote dagegen über dem Grenzwert liegende Resultate. Orange Werte liegen genau am Grenzwert. Als Grenzwert wurde die QK A2-G laut BAWP23 gewählt, da diese die strengsten Kriterien aufweist.

Bei Betrachtung der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass bei höheren Werten der Parameter TOC und KW-Index im Feststoff, welche aus der Verwendung von dieselbetriebenen Baugeräten stammen, auch ein Anstieg der NO_x sowie NH_4 beobachtet werden kann, während bei der Gewinnungssprengung aus der Breitenau niedrige Werte vorliegen. Daher könnte eine höhere Konzentration an NO_x sowie NH_4 tatsächlich zu einem gewissen Teil von DME stammen.

{Abbildung 2.3.6}

2.4. Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau Fertigstellungsgrad: 100%

4.1 Düsenuntersuchungen in Laborumgebung (Fertigstellung 100%)

Dieses Arbeitspaket ist abgeschlossen. An einem eigens entwickelten Versuchsstand wurden 11 verschiedene Düsenarten hinsichtlich des Flüssigkeitsvolumenstromes bei Drücken zw. 0,5 und 10 bar sowie deren Tröpfchengrößen bei Drücken zwischen 3,5 und 7 bar mit einem Laserbeugungsmessgerät untersucht. Zudem wurden Sprühweiten- und Sprühwinkelmessungen durchgeführt.

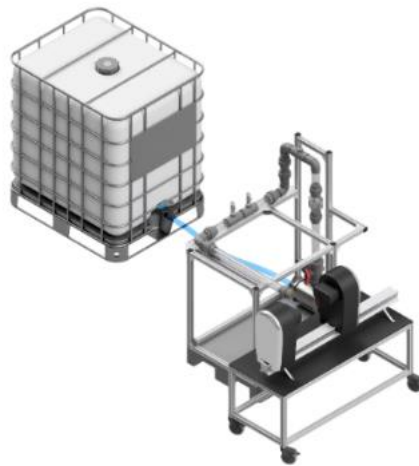


Abbildung 2.4.1: Übersichtsdarstellung



Abbildung 2.4.2: umgesetzter Aufbau zur laseroptischen Messung von Tröpfchengrößen nach einer Düse

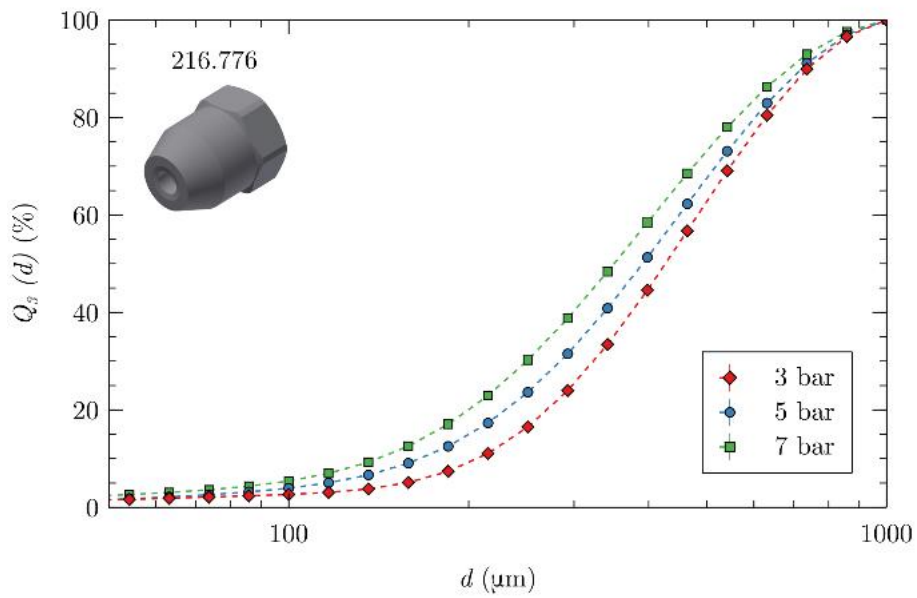


Abbildung 2.4.3: Ausgewähltes Beispiel für die Tröpfchengrößenverteilung einer Düse bei verschiedenen Drücken

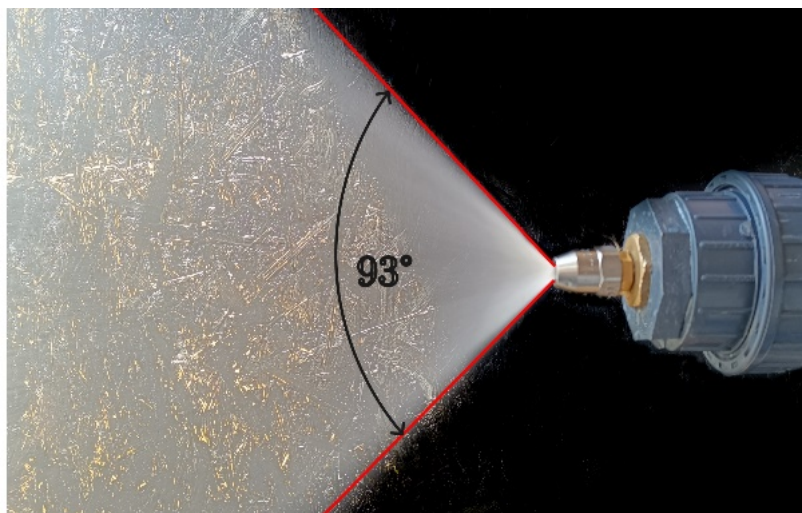


Abbildung 2.4.4: optische Messung des Sprühwinkels anhand von geometrisch referenzierten Bildern
Figure 11
Abbildung 2.4.5: Sprühweite und Sprühwinkel

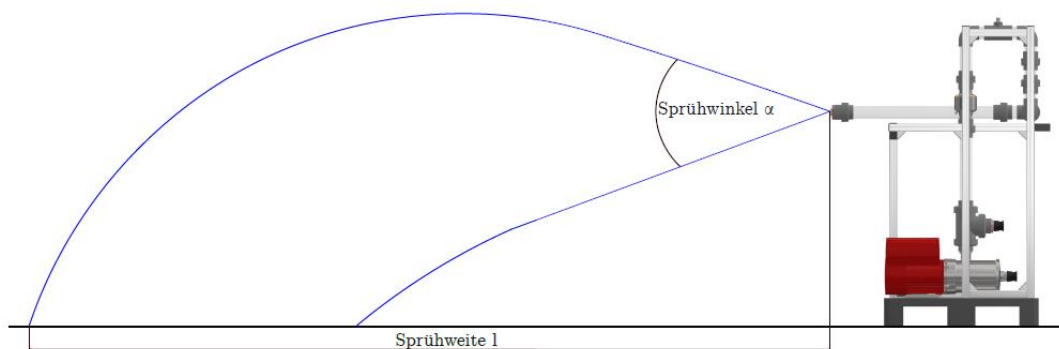


Abbildung 2.4.5: Sprühweite und Sprühwinkel

4.2 Staubuntersuchungen in Laborumgebung

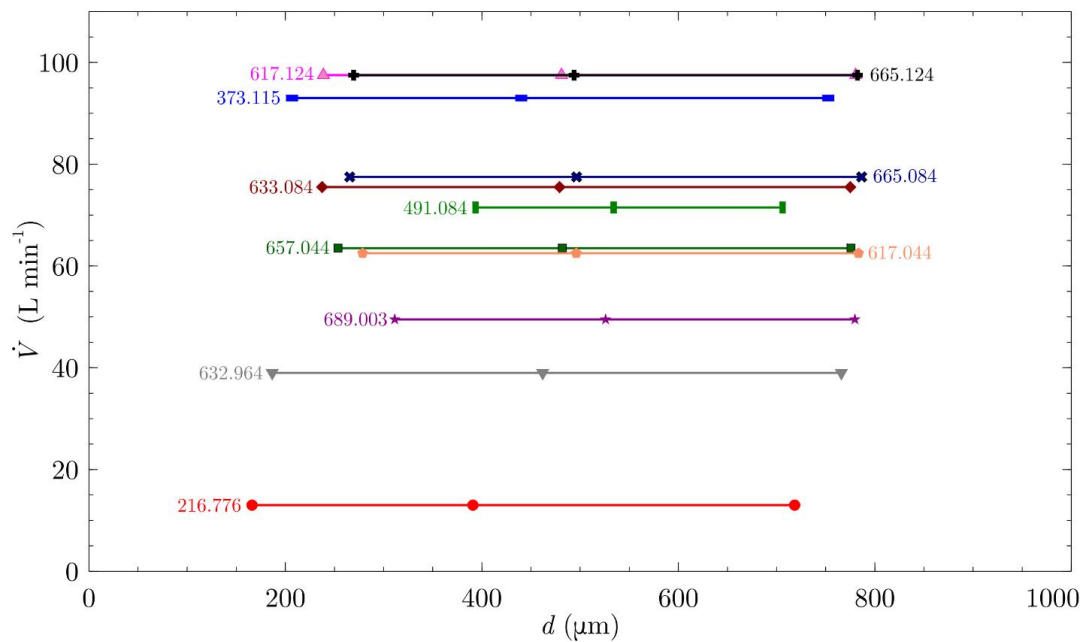


Abbildung 2.4.6: Zusammenfassende Darstellung der Tröpfchengrößenverteilung der verschiedenen Düsen bei 5 bar Druck. Die linken Punkte zeigen den d10, die mittleren den d50 und die rechten den d90 der jeweiligen Düse

Die Staubuntersuchungen in Laborumgebung beschäftigte sich u.a. mit der Frage nach einem geeigneten Versuchsstaub, um die Eigenschaften des lungengängigen Quarzstaubes im Labor abzubilden. Es konnte gezeigt werden, dass der Teststaub Sikron SF600 geeignet für die nachfolgenden Versuche ist.

Zudem wurde in diesem Arbeitspaket eine Technologie entwickelt, mit der feine Stäube kontinuierlich dosiert werden können.

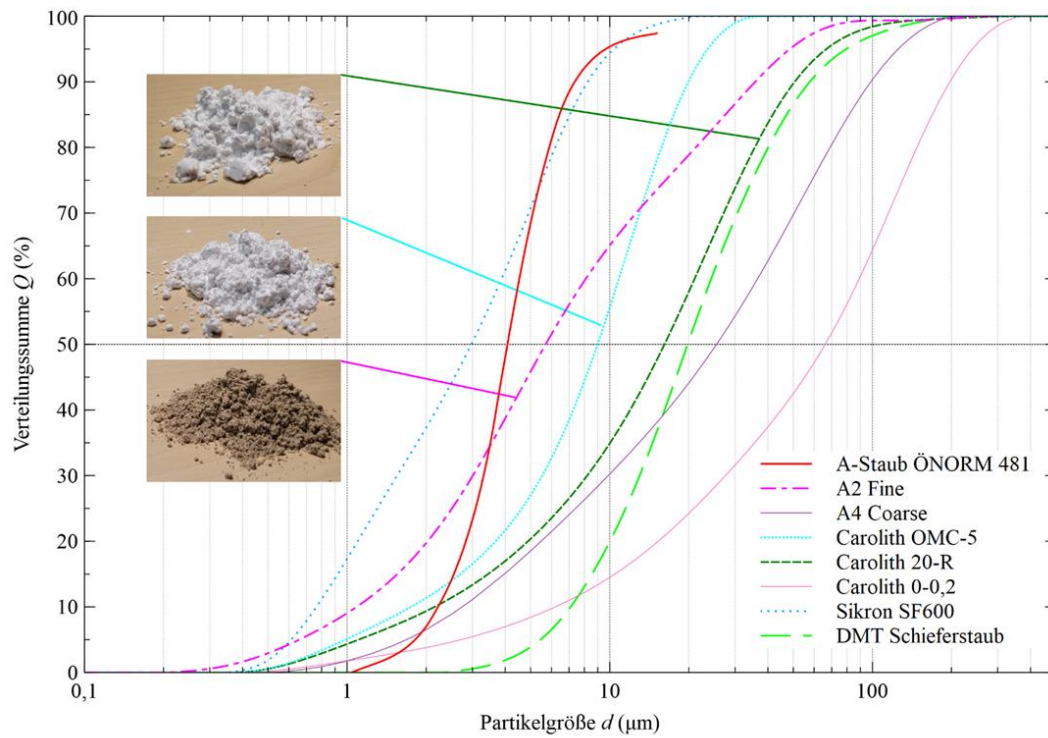


Abbildung 2.4.7: Zusammenfassende Darstellung der Korngrößenverteilungen der untersuchten Versuchsstäube



Abbildung 2.4.8: Verhalten des Teststaubes bei der Dosierung mittels der eigens entwickelten Dosieranlage
Figure Abbildung 2.4.9: Dosieranlage

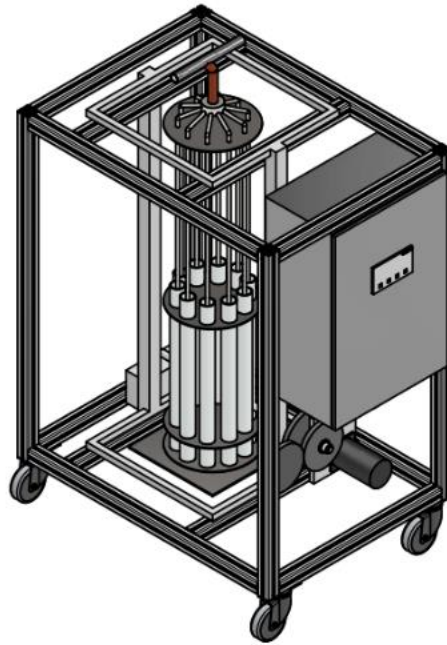


Abbildung 2.4.9: Dosieranlage



Abbildung 2.4.10: Dosierprinzip

4.3 Bau eines Sprühnebelsystems

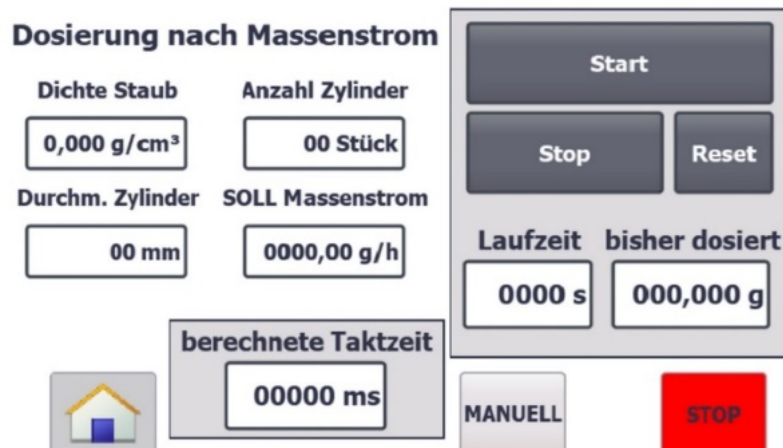


Abbildung 2.4.11: Ausschnitt aus der Bedienoberfläche der Dosiersteuerung

Der Bau des Sprühnebelsystems wird im Forschungsjahr 3 durchgeführt. Die dazugehörigen ersten Aarbeiten (Planung, Auslegung, Konstruktion wurden im Forschungsjahr 2 auf Basis der vorangegangenen Arbeitspakete (4.1 und 4.2) durchgeführt.



Abbildung 2.4.12: Zusammenführung der Düseninheit und der Dosiereinheit zur Bestimmung des Abscheideverhaltens des Sprühnebelsystems

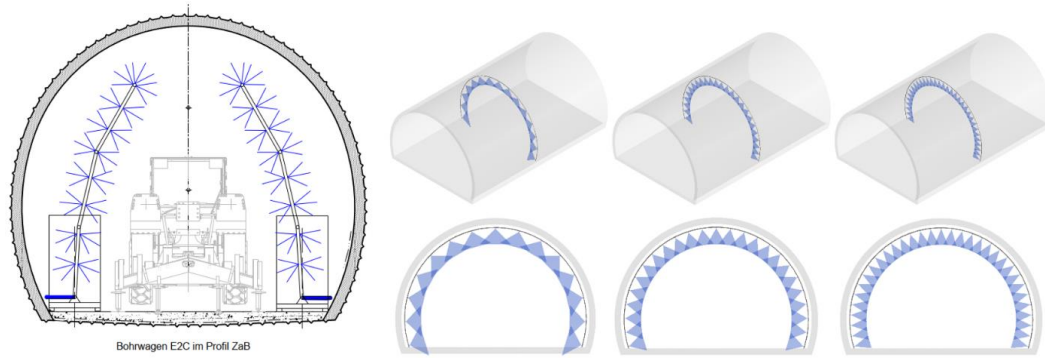


Abbildung 2.4.13: Konzeptplanung für das Sprühnebelssystem

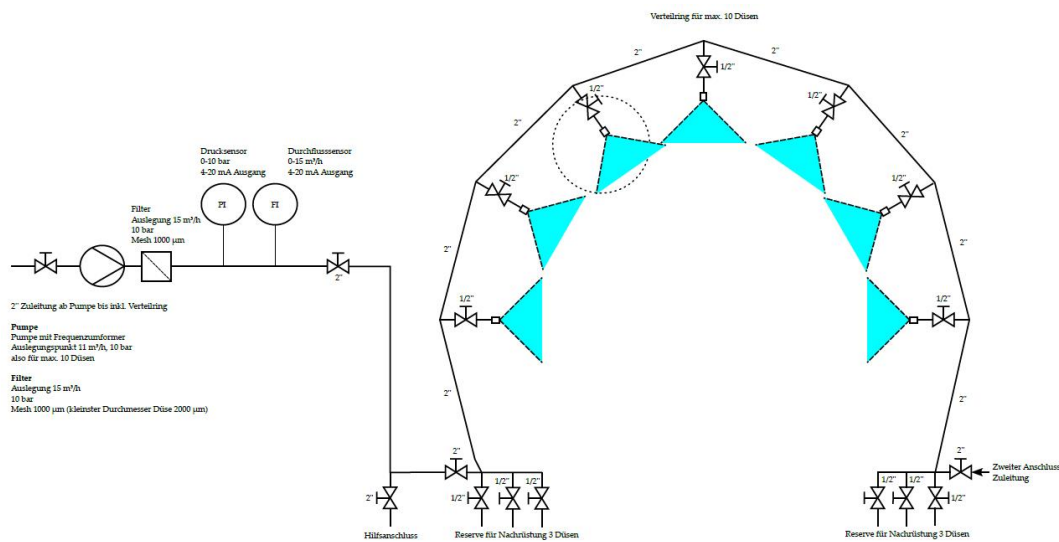


Abbildung 2.4.14: Verfahrensfließbild für ein Sprühnebelssystem mit Angabe der entscheidenden Parameter (Rohrleitungsdimensionen, Drücke, Volumenströme, Ventilanordnung, Sensorik)

2.5. Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess Fertigstellungsgrad: 100%

In den ersten beiden Monaten des Arbeitspakets „Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess“ standen vor allem vorbereitende Arbeiten im Fokus, um eine fundierte Basis für die kommenden Untersuchungen und praktischen Tests zu schaffen.

Zunächst wurden relevante Messmethoden und Parameter definiert, um die Wechselwirkungen zwischen Bewetterung und Bedüsung in verschiedenen Arbeitsphasen des Tunnelbaus gezielt erfassen zu können. Dies beinhaltete die Identifikation von Schlüsselparametern wie Luftströmung, Verdünnungsrate und Staubabscheidung, die für die spätere Simulation und Praxisversuche entscheidend sind. Gleichzeitig wurden erste Szenarien für eine optimierte Kombination beider Systeme in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess konzipiert.

Ein wichtiger Bestandteil der Vorbereitungen war zudem die Entwicklung eines Messkonzepts zur Erfassung der Staubkonzentration unter verschiedenen Bewetterungs- und Bedüsungseinstellungen. Dabei wurde festgelegt, an welchen Punkten innerhalb des Tunnels Messsensoren positioniert werden sollen und welche Referenzwerte für die spätere Bewertung der Effizienz herangezogen werden. In diesem Zusammenhang wurden auch erste Anforderungen an die Integration der Bedüsung in bestehende Lüftungssysteme formuliert, insbesondere im Hinblick auf eine automatisierte Anpassung der Ventilation on Demand (VOD).

Zur praktischen Umsetzung wurden geeignete Versuchsbereiche identifiziert und die logistischen Anforderungen für den späteren Testbetrieb abgestimmt. Dies umfasste die Klärung infrastruktureller Voraussetzungen, die Koordination mit den Forschungspartnern sowie die Spezifikation der benötigten technischen Ausstattung. Zudem wurden erste Vorbereitungen für eine Vergleichsstudie zwischen verschiedenen Bedüsungstechnologien getroffen, um deren Effektivität unter realen Bedingungen zu evaluieren.

Insgesamt konzentrierten sich die bisherigen Arbeiten auf die methodische und technische Planung der kommenden Untersuchungen. Durch die frühzeitige Definition von Testbedingungen und Messparametern wurden die Weichen für die folgenden praktischen Untersuchungen gestellt, in denen das Zusammenspiel von Bewetterung und Bedüsung im Tunnelbau gezielt analysiert und optimiert werden soll.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Bei den Kosten kam es zu keinen wesentlichen Änderungen. InKind-Leistungen wurden über die Zusagen hinaus dem Projekt zur Verfügung gestellt.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit der Projektergebnisse

Dieses Projekt hat Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlergehen der Bevölkerung. Durch Staubminimierung und -vermeidung wird der Arbeitnehmerschutz im Tunnelbau gefördert. Maßnahmen können dadurch schon bei der Arbeitsvorbereitung eines Projektes getroffen werden. Ziel ist die Herabsetzung der Fälle von chronischen Atemwegserkrankungen der Arbeitnehmer:innen im Tunnelbau, um ein gesundes Leben für alle Arbeitnehmer:innen jeden Alters zu gewährleisten und ihr Wohlergehen zu fördern.

Des Weiteren soll durch dieses Projekt ein Schritt zur Gleichstellung der Geschlechter im Tunnelbau erzielt werden, da durch die Staubminderung die Arbeitsbedingungen auch im Hinblick auf das Mutterschutzgesetz verbessert werden würden.

Nachhaltigkeitseffekte in 5 Jahren nach Projektabschluss

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes werden in die Regelwerke für die Arbeitssicherheit einfließen. Hierbei werden insbesondere die erzielten Messwerte in der Untertageforschungsanlage, die Neuentwicklung der Düsen, die Vorgangsweise im Rahmen der Simulationsberechnungen und die Konfigurationsparameter für die Auslegung der Bewetterung von zentralem Interesse sein. Damit wird es Auftraggebern und Planern zukünftig möglich sein, die Bewetterung in einer frühen Phase deutlich detaillierter auszulegen und so die Arbeitssicherheit den gesetzlichen Anforderungen entsprechend umsetzen zu können. Für die Unternehmen besteht der klare Nutzen in deutlich verbesserten Arbeitsbedingungen und damit einhergehend in einer Reduzierung von krankheitsbedingten Ausfällen ihrer Arbeitnehmer:innen.

Beitrag zum Klimaschutz

Durch die angestrebten räumlich in unterschiedlichen Positionen durchgeführten Messungen werden die Gase und Stäube sämtlicher Arbeitsprozesse nach dem Abschluss dieses Projektes deutlich besser bekannt sein. Dadurch können durch die optimierte, kombinierte Anordnung von Bewetterung und Bedüsung die Umweltbedingungen für jeden betrachteten Arbeitsschritt entsprechend verbessert werden. Durch ein Auswaschen der Tunnelluft von Gasen und Stäuben wird es gelingen, im Tunnelportalbereich signifikante Verbesserungen der Umweltbedingungen sicherzustellen. Sollte ein F&E-Ergebnis sein, dass reifengebundene Transporte zu erheblichen Belastungen mit Stäuben im lungengängigen Bereich und zudem auch den Großteil der schädlichen Gase Untertage verursachen, wird es zu einem Umdenken der Fördersysteme kommen müssen. Sollten Förderbänder anstatt der heute üblichen reifengebundenen Systeme zukünftig auch bei kürzeren Untertagebauprojekten zum Einsatz kommen, wird damit auch eine CO₂ Reduktion der Baustellen einhergehen. Gleichzeitig werden damit auch weniger Schadstoffe in das

Tunnelausbruchmaterial eingetragen, was zu einer Verbesserung der Verwertbarkeit und/oder Deponierbarkeit des Ausbruchmaterials führen wird.