

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	6
2.5. Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess	12
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	13
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	13

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die im Fördervertrag zugrundeliegenden Ziele des 3. Forschungsjahres beinhalten den Abschluss der Arbeitspakete Grundlagenerhebung aus Messtechnik und Simulation, die Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau sowie die Untersuchung der Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung.

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

Während dem dritten Forschungsjahres wurden keine neuen zeit- und stationsabhängigen Messungen im Rahmen des Projektes durchgeführt. Hier wurden weitere Untersuchungen der bereits vorhandenen Messergebnisse seitens MUL zusammengefasst und präsentiert (27.03.2025 in Angath). Auch von Seiten der ÖSBS wurde eine Zusammenschau aller arbeitsbezogenen Staubbmessungen erstellt und präsentiert (10.06.2025 in Innsbruck). Weiters wurden die DME-Konzentrationen (Dieselmotoremissionen) und Konzentrationen der Sprenggase in der Tunnelluft und Rückstände im Tunnelausbruchsmaterial erfasst und ausgewertet. Somit wurden die Ziele dieses Arbeitspaketes abgeschlossen.

Die Ziele des Arbeitspaketes Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau wurden bereits im zweiten Forschungsjahr erreicht.

Im Rahmen des Arbeitspaketes Optimierungspotenziale zwischen Bewetterung und Bedüsung in Abhängigkeit vom Arbeitsprozess wurden Versuche am ZaB und in Angath durchgeführt um die Entfernung und die Auslegung mehrerer Bedüsungsstationen zu optimieren. Hierbei konnten durch stationäre Messungen der Staubkonzentrationen in der Luft relevante Parameter für den Betrieb der Bedüsungsstationen evaluiert werden.

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 (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement abgewickelt.

Die Arbeitsschritte konnten plangemäß erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen gegenüber dem Projektantrag.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

AP 2 „wissenschaftliche Leitung“ wird von MUL und MCI übernommen. Der Projektverlauf wird von regelmäßigen Konsortialmeetings begleitet. Im dritten Forschungsjahr zählen dazu die Meetings am 27.03.2025 bei der BEMO am Rohbaustollen Angath, am 10.06.2025 bei der BBT und Porr im Baulos H53 in Wolf sowie abschließend am 16.12.2025 bei der ÖBV in Wien.

2.3. Grundlagenenerhebung aus Messtechnik und Simulation

Fertigstellungsgrad: 100%

Ermittlung der arbeitsprozessabhängigen Quarzstaubkonzentration im zyklischen Vortrieb (Fertigstellung 100%)

Die Arbeiten zur Ermittlung der arbeitsprozessabhängigen Quarzstaubkonzentration im zyklischen Vortrieb wurden bereits im 2. Forschungsjahr weitgehend abgeschlossen. Im vorliegenden Bericht werden ausgewählte Messungsergebnisse daher wiederholt, ehe die simulativen Auswertungen des 3. Forschungsjahres vorgestellt werden. Im Rahmen der Messkampagnen wurden Staubbmessungen bei insgesamt 11 Sprengungen auf verschiedenen Baustellen der Projektpartner durchgeführt. Dazu zählen unter anderem das Baulos H53 BBT-SE, der Rohbaustollen Angath der ÖBB, der Flucht- und Rettungstollen des Schmittentunnels, Tunnel Vierzehn der ASFINAG sowie Messungen im Zuge der Sanierungsarbeiten im Arlbergbergtunnel und in der Tunnelkette Golling–Werfen der A10.

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 erkennt man in 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

Staubkonzentrationen während der Sanierung einer Betonfahrbahn

Für die Sanierung der Betonfahrbahn am Arlbergtunnel erfolgte der Abtrag der alten Fahrbahn mittels einer Fräse. Die Messstationen wurden daneben auf dem Randweg platziert. Da das abgetragene Material direkt auf LKW's geladen und abtransportiert wurde und es manchmal zu längeren Wartezeiten auf LKW's gekommen ist, war dies kein kontinuierlicher Prozess. Andere Standzeiten waren unter anderem auch Instandsetzungsarbeiten an der Fräse bedingt. Die Betonfräse arbeitete in einer langsamen Gehgeschwindigkeit, welches zu großen Fortschritten führte. Eine wichtige Erkenntnis, die durch die Messung gewonnen werden konnte, war, 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.

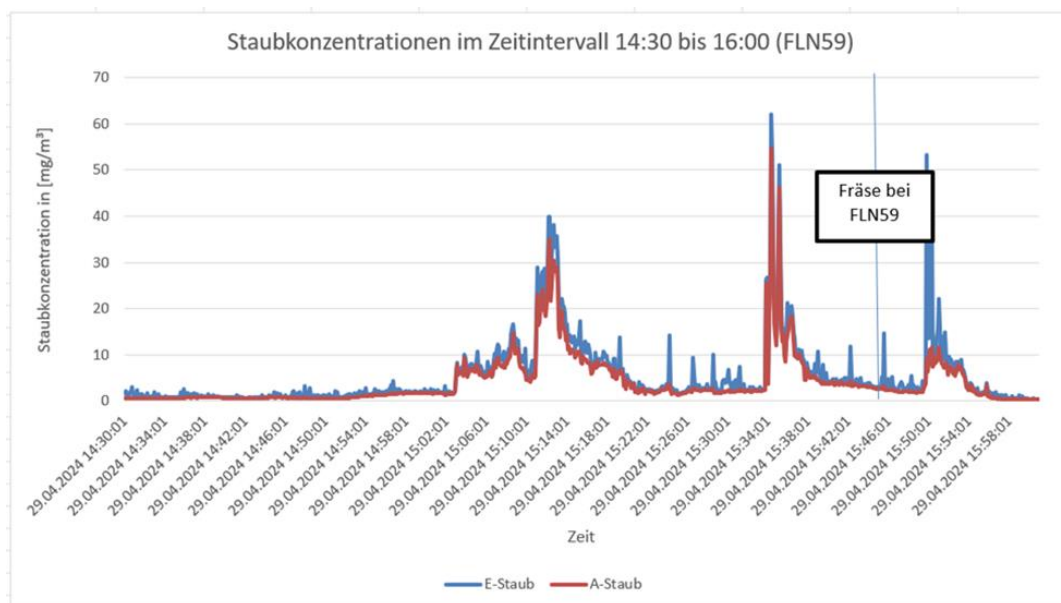


Abbildung 2.3.2: Gemessene A-Staub- sowie E-Staubkonzentrationen über ein beispielhaftes Zeitintervall

Zusammenführen aller Messergebnisse

Im weiteren Projektverlauf wurden sämtliche im Zuge der Baustellenmessungen erhobenen Daten zusammengeführt und einer einheitlichen Auswertung unterzogen. Auf Grundlage der jeweiligen Zyklusdiagramme der Vortriebsarbeiten erfolgte eine Zuordnung der gemessenen Konzentrationsverläufe zu den einzelnen Arbeitsschritten des Vortriebszyklus. Dadurch konnten die Messdaten systematisch in arbeitsprozessbezogene Abschnitte gegliedert und die auftretenden Staubkonzentrationen den jeweiligen Tätigkeiten im Vortriebsprozess zugeordnet werden.



Simulation der Verteilung der Quarzstaubkonzentration in unterschiedlicher Bewetterung (Fertigstellung 100%)

Auf mehreren Baustellen wurden A-Staubkonzentrationen gemessen und der Quarzgehalt im Tunnelstaub analysiert. Dabei erwiesen sich der Sprengvortrieb und insbesondere das Ablauten bzw. Berauben der Ausbruchsf lächen als Hauptquellen für respirablen Staub. Die erhobenen Messdaten dienen in weiterer Folge zur Validierung numerischer Simulationen und zur Bewertung der Wirksamkeit bestehender Lüftungs- und Staubminderungsmaßnahmen.

Seite 4 von 14

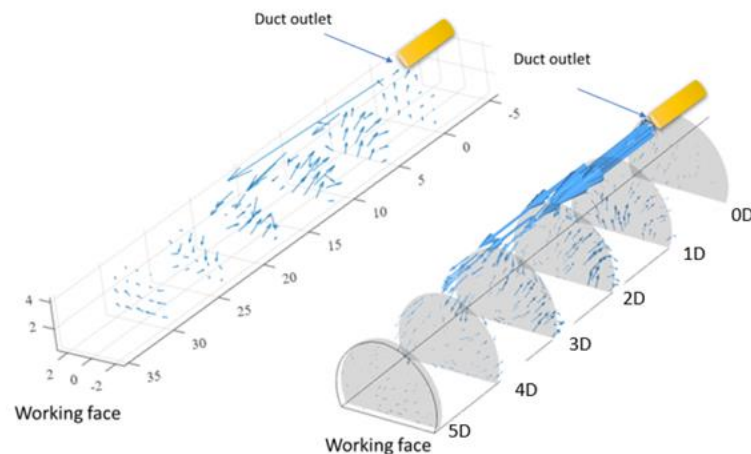


Abbildung 2.3.4: Vergleich der Strömungsmessergebnisse (links) und Simulationsergebnisse (rechts) [1]

Szenarioanalysen mit variierenden Lutte-Ortsbrust-Abständen und Ausblasgeschwindigkeiten zeigen, dass gängige Konfigurationen die verschärften Grenzwerte oft nicht sicher einhalten. Eine Reduktion auf etwa 5D sowie erhöhte Volumenströme verbessern die Staubabfuhr signifikant. Das validierte CFD-Werkzeug bildet damit eine belastbare Grundlage zur Optimierung von Lüftungskonzepten im Hinblick auf Arbeitsschutz und Grenzwerteinhaltung.

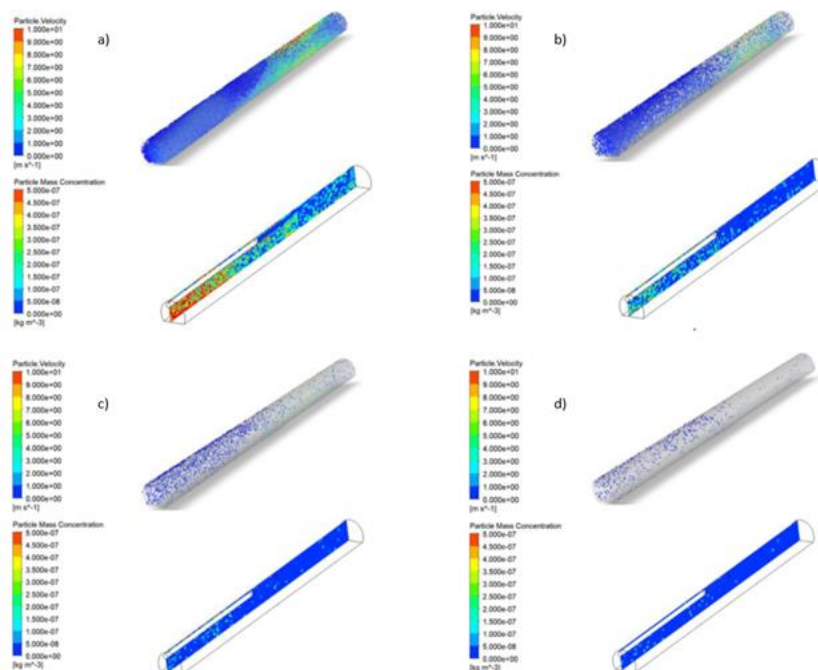


Abbildung 2.3.5: Ergebnisse der Partikelsimulation mit einem Luttenabstand von 31,75 m und einer Ausblasgeschwindigkeit von 19 m/s nach a) 1 Minute, b) 2 Minuten, c) 3 Minuten und d) 4 Minuten [1]

Bestimmung der Rückstände von Sprengmittel und DME im Ausbruchsmaterial (Fertigstellung 100%)

Eine eindeutige Trennung der Herkunft von Stickstoffverbindungen im Ausbruchsmaterial aus Sprengmitteln und Dieselmotoremissionen (DME) ist aufgrund überlagerter Eintragspfade sowie umgebungsabhängiger Umwandlungsprozesse nur eingeschränkt möglich. Vor diesem Hintergrund wurde die Kontamination von Tunnelausbruchmaterial im konventionellen Vortrieb systematisch untersucht, wobei insbesondere

Ammonium, Nitrat und Nitrit im Hinblick auf geltende Grenzwerte gemäß Deponieverordnung, Bundesabfallwirtschaftsplan und Recycling-Baustoffverordnung betrachtet wurden.

Neben einer Literaturswertung zu chemischen und mikrobiologischen Prozessen im Hauwerk – unter Berücksichtigung anoxischer Bedingungen und erhöhter pH-Werte durch Spritzbeton – wurden bestehende Datensätze analysiert und neue Proben aus Spreng- und mechanischen Vortrieben sowie aus dem untertägigen Bergbau normgerecht untersucht (Feststoff und Eluat). Die Ergebnisse der neu gezogenen Proben können aus Tabelle 1 entnommen werden. Ergänzend erfolgte eine Korrelationsanalyse zwischen Stickstoffparametern und Dieselindikatoren (KW-Index, TOC).

Nr.	Ort	Feststoff			Eluat					
		Bestimmung DME			Bestimmung DME		Bestimmung Sprengmittel			
		TOC	KW-Index	PAK (16)	TOC	KW-Index	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	pH-Wert
		[% - C TS]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[mg/kg TM]	[·]
1	Baustelle A	0,379	< 16	< 0,026	21,6	< 0,54	1,7	< 2,1	< 11	12,1
2		0,386	< 16	< 0,026	12,8	< 0,54	1,1	< 2,1	< 11	10,8
3		0,382	40	< 0,026	16	< 0,54	0,74	< 2,1	< 11	12,2
4		0,499	260	< 0,028	14,1	5,2	1,6	< 2,3	< 12	12
5		0,449	63	< 0,026	< 10	1,9	0,63	< 2,1	< 11	11,5
6	Baustelle B	0,395	230	< 0,027	225	14	14	< 2,1	430	12,1
7		0,365	66	< 0,027	26,4	7,5	4,1	< 2,2	26	12,5

Abbildung 2.3.6: Analyseergebnisse der neu gewonnenen Proben [2]

Die Ergebnisse zeigen, dass erhöhte TOC- und KW-Index-Werte, als Indikatoren für DME, häufig mit erhöhten NO_x- und NH₄-Konzentrationen einhergehen. Demgegenüber wiesen Proben aus Gewinnungssprengungen bei effektiver Bewetterung niedrige Stickstoffgehalte auf. Dies deutet darauf hin, dass Dieselmotoremissionen einen relevanten und bislang unterschätzten Beitrag zur Stickstoffbelastung leisten.

Die Resultate verdeutlichen, dass für die Bewertung von Ausbruchsmaterial sowohl Sprengmittel- als auch DME-Einflüsse sowie die standortspezifischen Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen sind.

2.4. Entwicklung eines Sprühnebelsystems zur Bindung von lungengängigem Quarzstaub im Tunnelbau

Fertigstellungsgrad: 100%

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: a) Messaufbau zur Bestimmung der Tröpfchengrößenverteilung; und b) Umgesetzter Aufbau (rechts) zur laseroptischen Messung von Tröpfchengrößen nach einer Düse

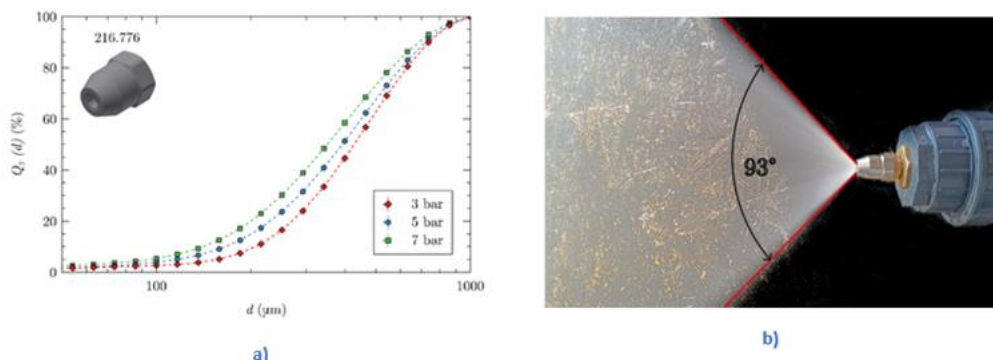


Abbildung 2.4.2: a) Ausgewähltes Beispiel für die Tröpfchengrößenverteilung einer Düse bei verschiedenen Drücken; und b) optische Messung des Sprühwinkels anhand von geometrisch referenzierten Bildern

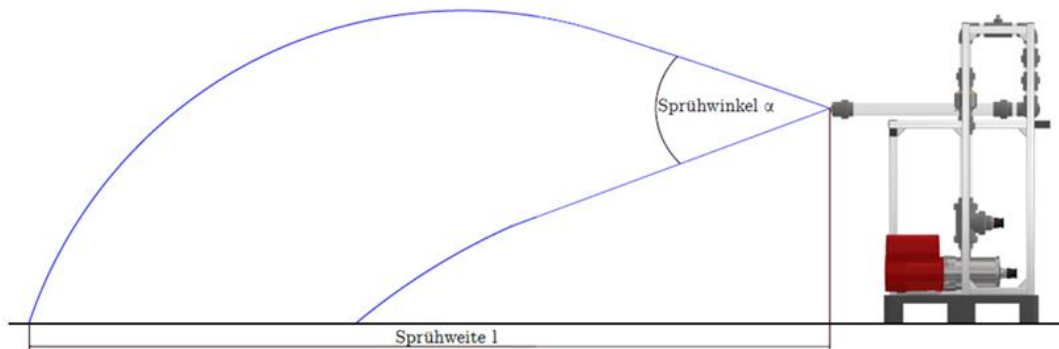


Abbildung 2.4.3: Sprühweite und Sprühwinkel

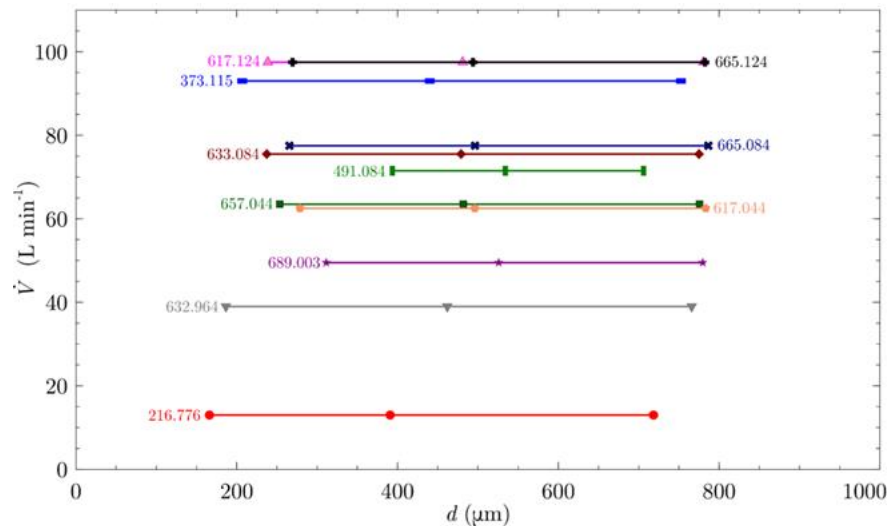


Abbildung 2.4.4: Zusammenfassende Darstellung der Tröpfchengrößenverteilung der verschiedenen Düsen bei 5 bar Druck. Die linken Punkte zeigen den d10, die mittleren den d50 und die rechten den d90 der jeweiligen Düse

Staubuntersuchungen in Laborumgebung (Fertigstellung 100%)

Die Staubuntersuchungen in Laborumgebung beschäftigen 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.

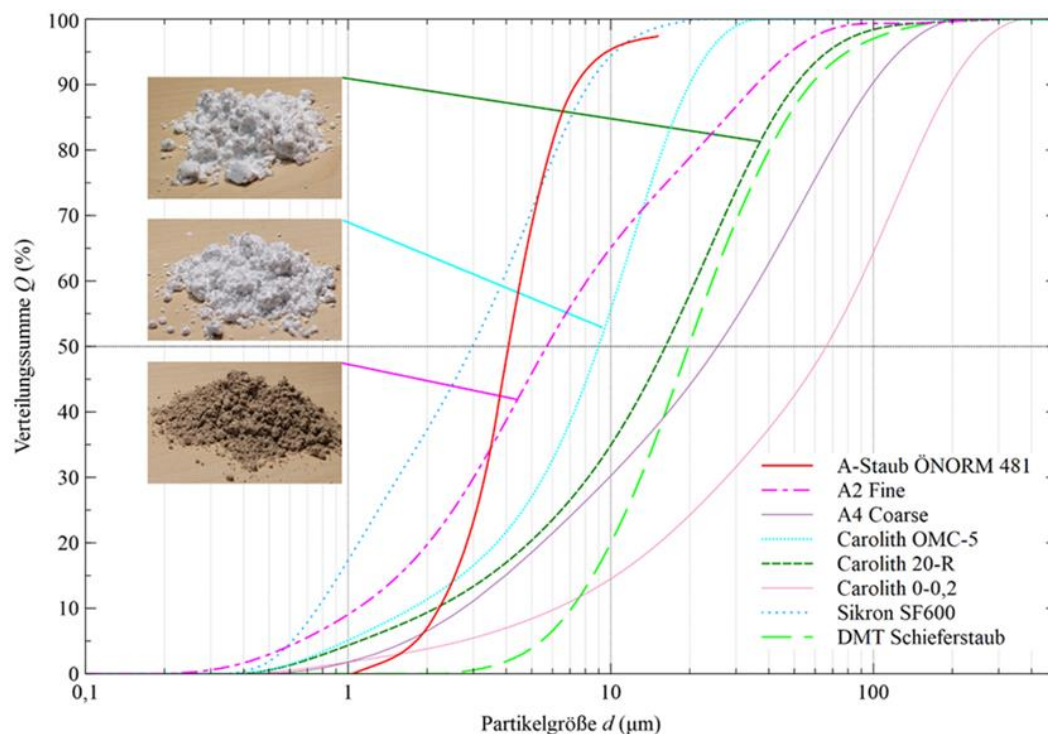


Abbildung 2.4.5: Zusammenfassende Darstellung der Korngrößenverteilungen der untersuchten Versuchsstäube

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

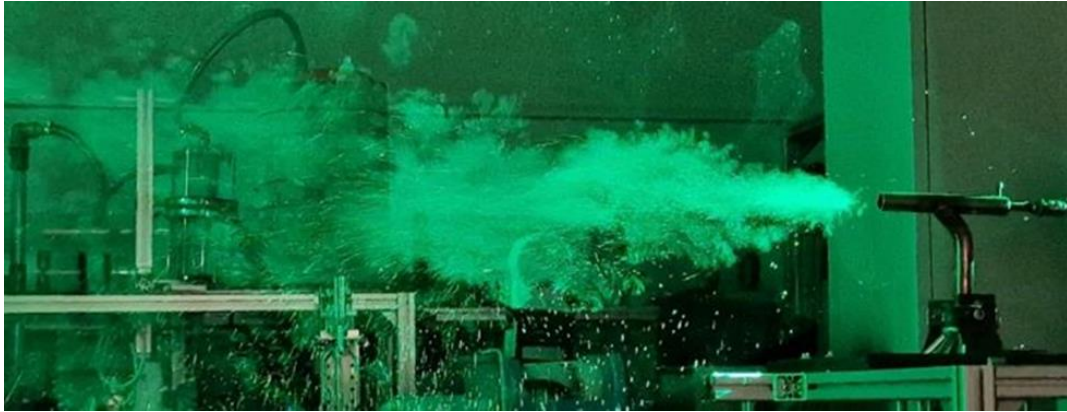


Abbildung 2.4.6: Verhalten des Teststaubes bei der Dosierung mittels der eigens entwickelten Dosieranlage



Abbildung 2.4.7: a) Dosieranlage, b) Dosierprinzip und c) Ausschnitt aus der Bedienoberfläche der Dosiersteuerung

Bau eines Sprühnebelsystems (Fertigstellung 100%)

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

Basierend auf den Ergebnissen der Düsen- sowie Staubuntersuchungen aus dem Forschungsjahr 2 wurde im Forschungsjahr 3 ein Konzept zur Verwirklichung der Bedüsungstation ausgearbeitet. Für reproduzierbare Versuche zur Bestimmung des Abscheidegrades wurde ein Tunnel im Labormaßstab aufgebaut, um optimierte Betriebsparameter und den gravimetrisch Abscheidegrad für die Bedüsungstation herauszufinden.

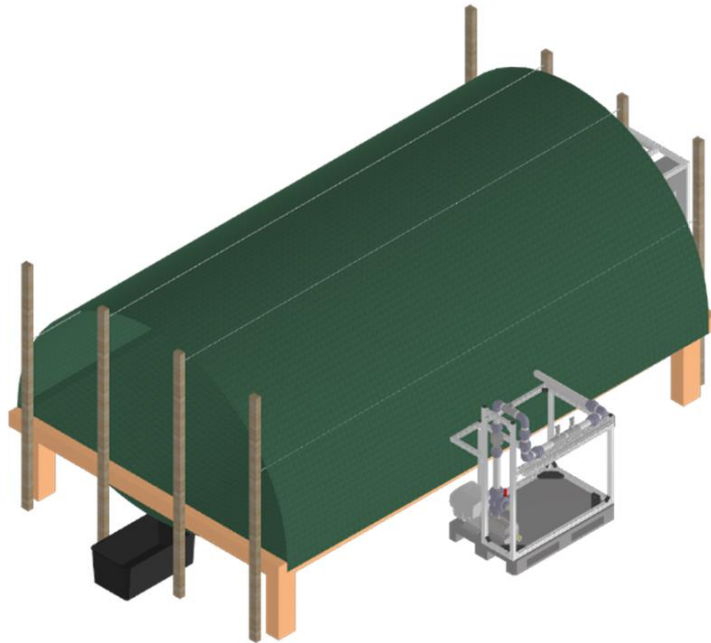


Abbildung 2.4.8: Aufbau Versuchsreihen der Bedüsungstation im Labormaßstab



Abbildung 2.4.9: Zusammenführung der Düseneinheit und der Dosiereinheit zur Bestimmung des Abscheideverhaltens des Sprühnebelsystems

Die Ergebnisse dieser Laborversuche gaben Auskunft über Parameter wie Betriebsdruck, und Fläche pro Düse, welche für die Auslegung der Düsenkränze für den realen Tunnelmaßstab relevant sind.

Am Zentrum am Berg konnten 2 weitere Versuchsreihen durchgeführt werden, bei denen mittels gezielter Staubbispingierung sowie Sprengungen die Wirksamkeit der Düsenkränze ermittelt werden. Ergebnisse dieser Versuchsreihen bringen weitere Optimierungen wie Düsenkranzanzahl bzw. Betriebsdauer der Düsenkränze hervor. Ebenso wurden Düsenkränze am Rohbaustollen Angath sowie in der Haupttröhre und im Erkundungsstollen am Brenner Basistunnel realisiert im dort die Staubbelaftung während des zyklischen Vortriebes zu reduzieren.



Abbildung 2.4.10: Schematische Düsenkranzauslegung für den BBT und umgesetzter Düsenkranz am ZaB

Evaluierung des Sprühnebelsystems (Fertigstellung 100%)

Versuche welche im Labormaßstab durchgeführt worden sind, weisen einen sehr hohen Abscheidegrad für den größeren Carolith (0-200 µm) Staub mit einem Mediandurchmesser von ca. 70 µm auf. Der alveolengängige Quarzstaub mit einem Mediandurchmesser von ca. 4 µm wird mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 40-50 % abgeschieden.

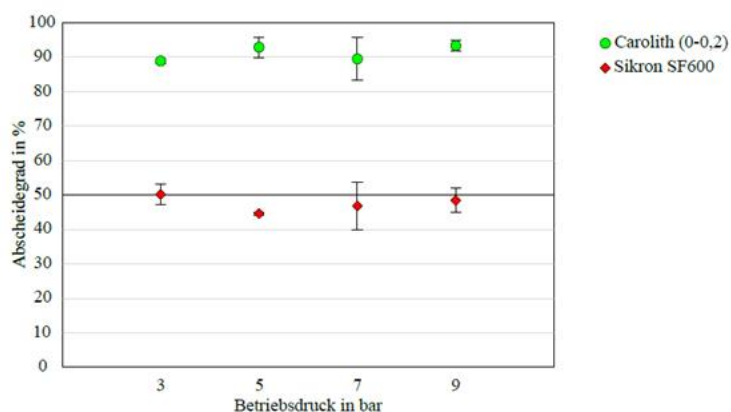


Abbildung 2.4.11: Abscheidegrade beider Versuchsstäube während der Laborversuche bei verschiedenen Betriebsdrücken

Bei Messungen am Zentrum am Berg wurden im März und August des 3. Forschungsjahres die Wirksamkeit der Düsenkränze experimentell ermittelt. Hierbei wurde die A-Staubkonzentration vor und nach den Düsenkränzen gemessen.

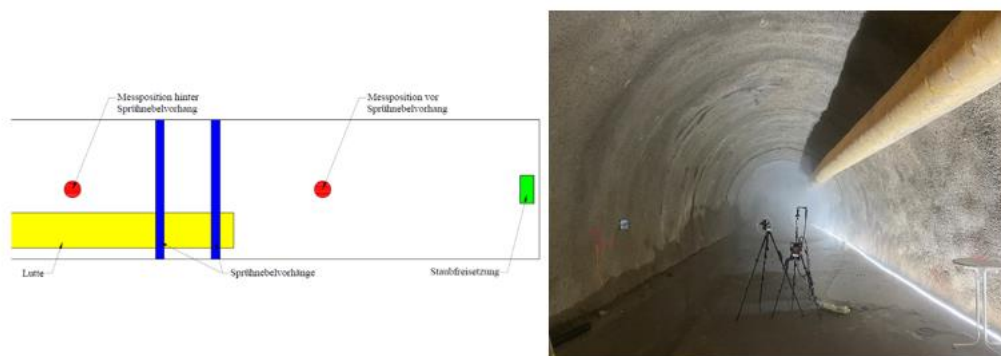


Abbildung 2.4.12: Versuchsaufbau am Zentrum am Berg zur Abscheidegradbestimmung der Düsenkränze

Die Auswertung der Messdaten der Tunnelmessungen weisen Abscheidegrade im ähnlichen Bereich wie bei den Laborversuchen auf. Die Versuche weisen deutlich auf, dass durch den Einsatz von Zerstäuberdüsen in Form eines Düsenkranzes die A-Staubkonzentration in dem Arbeitsbereich auf Tunnelbaustellen reduziert werden kann. Da die Wasserversorgung im Arbeitsbereich von Tunnelbaustellen meist sehr aufwändig ist, wird eine Anzahl von 2 Düsenkränzen empfohlen.

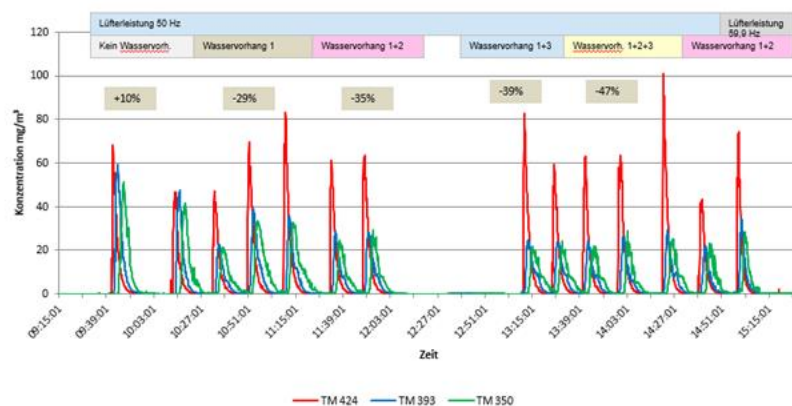


Abbildung 2.4.13: A-Staubkonzentrationsverlauf bei den Versuchsreihen am ZaB

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

Optimierung von saugender und drückender Bewetterung (Fertigstellung 100%)

Aus den zusammengeführten Messdaten und den validierten Simulationen ergibt sich, dass drückende Bewetterung die Schwaden- und Staubfahnen im zyklischen Vortrieb wirksam entlang des Tunnels verdünnt und verdrängt. Die Optimierungsempfehlungen (u. a. Reduktion des Luttenabstands auf etwa 5D und Erhöhung der Volumenströme) stützen diese Betriebsweise eindeutig. Für die im Projekt betrachteten Szenarien zeigte sich damit die drückende Variante als vorzugswürdig. Ein Effizienzvorteil saugender Konfigurationen ließ sich auf Basis der verfügbaren Daten und Erfahrungen der wirtschaftsnahen Projektpartner nicht ableiten. Vor diesem Hintergrund wurde eine explizite Gegenüberstellung „rein saugend“ vs. „drückend“ nicht aufgesetzt. Der Zusatznutzen wäre gegenüber der bereits belegten Wirksamkeit der drückenden Konfiguration gering gewesen und nur für Extrembeispiele (z.B. Asbest) relevant. Daher die verifizierte Optimierung der drückenden Bewetterung (inkl. Parametervariationen in der Simulation) sowie die Kopplung mit der Bedüsung konzentriert weiterentwickelt.

Kombination der VOD mit Entstaubungsanlage und Sprühnebelsystem am ZaB (Fertigstellung 100%)

Am Zentrum am Berg wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Wirksamkeit der in 4.4 vorgestellten Düsenkränze durchgeführt. Variiert wurden insbesondere Anzahl der Düsenkränze, deren Abstand zueinander und zur Ortsbrust sowie die zeitliche Zuschaltung im Zyklus (z. B. in Bezug auf Sprengung und Bewetterung). Die A-Staubmessungen vor sowie nach den Düsenkränzen zeigten Abscheidegrade in ähnlicher Größenordnung wie im Labormaßstab. Die wirksamen Zeitfenster orientierten sich dabei am typischen Konzentrationsverlauf: Nach dem ersten Peak infolge der Sprengung (Staubaufwirbelung) erwies sich eine frühe Zuschaltung der Bedüsung als vorteilhaft, gefolgt von einer ausreichend langen Betriebsdauer bis zur einsetzenden Verdünnung durch die drückende Bewetterung. In der Praxis wurden Sequenzen getestet, in denen die Bedüsung unmittelbar nach dem Peak zugeschaltet und mit der Bewetterung überlappt betrieben wurde; so ließ sich die durch die Lüftung eingeleitete Verdrängung mit der aerosolinduzierten Bindung kombinieren, ohne unnötige Laufzeiten der Düsenkränze zu verursachen.

Optimierung der Bewetterung in der Simulationsphase durch die Anordnung verschiedener Ventilationssysteme und/oder Sprühnebeleinrichtungen (Fertigstellung 100%)

Das validierte Simulations-Werkzeug, veröffentlicht in [1], wurde für Szenarioanalysen eingesetzt (Variation von Lutte-Ortsbrust-Abständen, Ausblasgeschwindigkeiten und Betriebszeitpunkten), um prozessspezifische Zuschaltzeitpunkte und Mindestbetriebsdauern der Bewetterung in Kombination mit Bedüsung abzuleiten. Die gute Übereinstimmung der Strömungs- und Partikeldispersionsimulationen mit in-situ-Luftgeschwindigkeiten und gemessenen Staubverläufen bestätigt die Eignung des Ansatzes für die frühphasige, projektspezifische Planung und Auslegung. Aufgrund unterschiedlicher Geometrien und Randbedingungen sind pauschale Regeln für Dauer oder Einschaltzeitpunkte nicht zweckmäßig. Die Parameter müssen szenariospezifisch bestimmt werden. Die methodische Vorgehensweise ist damit jedoch bestätigt und die zugrunde liegenden Simulationsansätze validiert, sodass ihre Anwendung als belastbares, breit einsetzbares Werkzeug zur effizienten Ermittlung notwendiger Bewetterungs- und Bedüsungsparameter in unterschiedlichen Tunneln gilt.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Die Firma BEMO hat die Kosten für die Bereitstellung der Lüfter vollständig übernommen, dies spiegelt sich dadurch auch in der wesentlich höheren InKind Leistung wider. Die entstandenen Mehrkosten können damit gegengerechnet werden, dass keine Kosten durch Zusatzmaterial der ÖSTU & die Korfmann Lufttechnik verursacht wurden und deren InKind Leistung somit geringer ausfällt.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Im Vordergrund steht der gesundheitliche Nutzen für die Beschäftigten im Tunnelbau. Durch die systematische Minimierung und Vermeidung von Staubexpositionen werden der Arbeitnehmerschutz gestärkt und die Fälle chronischer Atemwegserkrankungen langfristig reduziert. Die Projektergebnisse ermöglichen es zudem, bereits in der Arbeitsvorbereitung geeignete Maßnahmen zu definieren und damit Gesundheit und Wohlergehen über alle Altersgruppen hinweg zu fördern. Ergänzend leistet die Staubminderung einen Beitrag zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen im Sinne des Mutterschutzgesetzes und unterstützt so Gleichstellungsziele im Tunnelbau.

Methodisch beruht der Nachhaltigkeitsbeitrag auf der Verknüpfung validierter Simulationen, prozessbezogener Messauswertungen und der Entwicklung eines wirksamen Sprühnebelsystems. Die kombinierte, frühphasige Auslegung von Bewetterung und Bedüsung ermöglicht eine gezielte „Auswaschung“ von Stäuben sowie eine optimierte Luftführung, wodurch Emissionen im Tunnel und in Richtung Portal verringert werden. In situ am Zentrum am Berg und auf Baustellen bestätigten Messreihen die Reduktion der A-Staubkonzentration durch Düsenkränze. Im Baustellenbetrieb wird angesichts typischer Einschränkungen in der Wasserversorgung der Einsatz von zwei Düsenkränzen empfohlen. Die im Labormaßstab ermittelten Betriebsparameter konnten dabei in den Realmaßstab überführt und für die Auslegung genutzt werden.

Die Ergebnisse fließen in Regelwerke der Arbeitssicherheit ein und erhöhen damit Planungs- und Rechtssicherheit: Auftraggeber und Planer können Lüftungskonzepte frühzeitig und detailliert dimensionieren, Grenzwerte zuverlässig einhalten und gleichzeitig die Arbeitsbedingungen verbessern, was

krankheitsbedingte Ausfälle reduziert. Darüber hinaus schafft die methodische Basis die Voraussetzung, emissions- und ressourceneffiziente Prozessketten projektspezifisch auszuwählen und so ökologische und betriebliche Nachhaltigkeit gemeinsam zu adressieren.