

Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Werkstoffsystemen auf der Basis mineralischer Rest- und Abfallstoffe für den energieeffizienten Einbau von Hochspannungstrassen

Phase 1

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34246/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Trasswerke Meurin
Produktions- und Handelsgesellschaft mbH

Andernach, Oktober 2020

Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Werkstoffsystemen auf der Basis mineralischer Rest- und Abfallstoffe für den energieeffizienten Einbau von Hochspannungstrassen

Phase 1

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34246/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Albert Nies
Trasswerke Meurin
Produktions- und Handelsgesellschaft mbH

Andernach, Oktober 2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34246/01-23	Referat	Fördersumme	125.000 Euro
----	--------------------	---------	-------------	---------------------

Antragstitel **Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Werkstoffsystemen auf der Basis mineralischer Rest- und Abfallstoffe für den energieeffizienten Einbau von Hochspannungstrassen**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	01.08.2019	31.07.2020	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Trasswerke Meurin Produktions- und Handelsgesellschaft mbH Kölner Str. 17 56626 Andernach	Tel	02632/70231
		Fax	
		Projektleitung	Hr. A. Nies
		Bearbeiter	Hr. A. Nies (Trasswerke) Dr. sc. nat. A. Lipowsky

Kooperationspartner IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Inhalt dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines neuartigen hochwärmeleitfähigen Verfüllbaustoffes auf der Basis mineralischer Rest- und Abfallstoffe der Natursteingewinnung und polymermodifizierter Werkstoffsysteme. Die Rezepturentwicklung soll die Applikation von Sekundärrohstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit beinhalten und die puzzolanischen Bindungskapazitäten von Trass und Tuff nutzen. Das Projektziel besteht in der Entwicklung einer praxisgerechten Formulierung des Werkstoffsystems sowie des Verarbeitungsprozesses.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Erarbeitung der Forschungsziele soll in zwei Projektphasen erfolgen. In einer ersten Phase wurden sämtliche bautechnische Kenngrößen definiert und Rezepturen für geeignete wärmeleitfähige Verfüllbaustoffe erstellt.

Die Phase 1 dieses Projektes zur innovativen Verwertung von mineralischer Rest- und Abfallstoffe beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Analyse der Ausgangssituation bezüglich technischer Vorgaben zur Herstellung von Verfüllungen; Erarbeitung eines Lastenhefts
- Charakterisierung der Ausgangskomponenten; Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit zur Wasserspeicherfähigkeit
- Rezepturentwicklung im Labormaßstab
- Entwicklung Fertigungs- und Produktionstechnologie sowie Test zum Verarbeitungsverhalten
- Tests zur Herstellung und Anpassung der Verfahrenstechnologie.

Ergebnisse und Diskussion

Für die bei der Gewinnung von Trass und Tuff entstehenden Feinfraktionen wurden innerhalb des Projektes Verwertungslösungen als Verfüllbaustoff gesucht.

Die Feinfraktionen von Trass und Tuff können in einem fließfähigen Verfüllbaustoff eingesetzt werden. Trass und Tuff bewirken dabei weder eine gesteigerte Wärmeleitfähigkeit noch ein gesteigertes Wasserhaltevermögen. Der zu ersetzende Zement wirkt in den Rezepturen wärmeleitfähigkeitsfördernd, da er durch das Auftreten festigkeitsbildender Phasen eine hohe Packungsdichte erzielt. Das kann durch die Eigenschaften von Tuff/Trass nicht substituiert werden.

Trass und Tuff wirken in der Kombination mit dem Anfallstoff Vorwärmerkalk positiv. Durch den Vorwärmerkalk wird zusätzlich Calciumhydroxid in das System eingebracht, welches die puzzolanische Reaktion des Trasses begünstigt bzw. auslöst. Rezepturen mit guter Wärmeleitfähigkeit sind das Ergebnis. Jedoch muss der Einsatz von Vorwärmerkalk kritisch gesehen werden, da er häufig umweltrelevante Stoffe wie z.B. Chloride enthält. Deshalb wurde im laufenden Projekt auf einen weiteren Einsatz des Vorwärmerkalkes verzichtet.

Die Wärmeleitfähigkeiten der entwickelten Mischungen liegen in der Höhe der wärmeleitfähigkeitsoptimierten Referenzmaterialien. Geeignete Verfahren zum Mischen und Verfüllen des Materials konnten innerhalb des Projektes erprobt werden. Die bisher entwickelte, für diese Art Verfüllmaterial vorgesehene Maschinentchnik, kann mit der Ausnahme kleiner Modifikationen eingesetzt werden.

Die Anforderungen an das Verpressmaterial, wie in der VDI-Richtlinie 4640 beschrieben, konnten mit Ausnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, erfüllt werden. Da es sich bei Trass um ein Puzzolan handelt, kann der Durchlässigkeitsbeiwert vielleicht zu einem späteren (Erhärtungs)Zeitpunkt erreicht werden. Bei einer puzzolanischen Reaktion handelt es sich um eine langsam ablaufende Reaktion und die Festigkeit steigt über die Zeit sowie auch die Dichtigkeit des Mörtels über die Dauer zunimmt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Es wird Veröffentlichungen in Fachmagazinen zu diesem Thema geben, wenn passende Themenumfelder gegeben sind.

Fazit

Grundsätzlich sind die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt durchaus ermutigend. Trass und Tuff lassen sich für ein wärmeleitfähiges Verfüllmaterial einsetzen. Mit Ausnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes können die getesteten Anforderungen an das Verpressmaterial erfüllt werden.

Die gewünschten Wärmeleitfähigkeiten von $3,0 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ konnten jedoch nicht erreicht werden. Das im Antrag zitierte Referenzmaterial mit dieser Wärmeleitfähigkeit konnte nicht erworben und somit auch nicht getestet werden. Auf dem Markt übliche wärmeleitfähige Verfüllmörtel erzielen mit unseren Entwicklungen vergleichbare Wärmeleitfähigkeiten.

Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, sowie betonaggressive Grundwässer wurde nicht getestet, da keine Mischung mit gewünschter Wärmeleitfähigkeit von $3,0 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ entwickelt werden konnte und sich die Projektbearbeitung im laufenden Betrieb darauf fokussierte.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	11
Einleitung	12
Hauptteil	13
1 Stand der Technik	13
1.1 Erdkabel	13
1.2 Erdwärmesondenkontaktmörtel	14
1.2.1 Bautechnische Anforderungen an Verpressmörtel für Wärmesonden	14
2 Wärmeleitfähigkeit	15
2.1 Lösungsansätze zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit.....	16
2.1.1 Additive zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit.....	17
2.1.2 Additive mit Wasserspeichervermögen	17
3 Ausgangsmaterialien	18
3.1 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien	18
3.2 Korngrößenanalyse	22
3.3 Referenzmaterial	23
4 Messprogramm	23
4.1 Messungen an der Suspension.....	23
4.2 Instationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung.....	26
4.3 Stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung	27
4.4 Druckfestigkeit	28
4.5 Wasserdurchlässigkeit.....	28
4.6 Quecksilberdruckporosimetrie	29
5 Mischungen/Rezepturen	30
6 Ergebnisse in Beziehung zur Wärmeleitfähigkeit	31
6.1 Dichte	31
6.2 Wärmeleitfähigkeitsadditive	32
6.3 Wasserhaltevermögen	34
6.4 Wassergehalt.....	35
6.5 Stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung	37
6.6 Vergleich instationäre und stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung	38
7 Packungsdichte	39
7.1 Annäherung an eine optimale Kornverteilungskurve	40
8 Porenverteilung/Porengefüge	43
9 Wasserdurchlässigkeitswert	48
10 Mischverfahren	48
10.1 Definition von relevanten technologischen Kenngrößen zur Auswahl der Mischverfahren	48
10.2 Auswahl und Untersuchungen an geeigneten Mischsystemen	49
10.2.1 Freifallmischer (handelsüblicher Betonmischer).....	49
10.2.2 Schneckenpumpen.....	50
10.2.3 Trommelfahrmischer.....	51
10.2.4 Zwangsmischer	52
10.2.5 Horizontalmischer HTC 140.....	54
Fazit/Schlussfolgerung	57

Literaturverzeichnis58

Verzeichnis Bilder

Abb. 1:	Kabelschächte mit verlegten Erdkabeln und Abstandshaltern während der Verfüllung mit Flüssigboden.....	13
Abb. 2:	REM Aufnahme des pulverförmigen Graphens	20
Abb. 3:	REM Aufnahme des pulverförmigen Siliciumcarbids.....	20
Abb. 4:	REM Aufnahme des pulverförmigen Eisenoxids	20
Abb. 5:	REM Aufnahme des pulverförmigen Edelkorunds.....	20
Abb. 6:	REM Aufnahme des pulverförmigen Mischkorunds.....	20
Abb. 7:	REM Aufnahme des pulverförmigen Basaltfüllers	20
Abb. 8:	REM Aufnahme des Trasspulvers bei 265er Vergrößerung.....	21
Abb. 9:	REM Aufnahme des Calciumbentonites bei 265er Vergrößerung.....	21
Abb. 10:	REM Aufnahme der Oberflächenstruktur des Trasses	22
Abb. 11:	REM Aufnahme der Oberflächenstruktur des Calciumbentonits	22
Abb. 12:	Korngrößenverteilung der verwendeten Ausgangsstoffe	23
Abb. 13:	Korngrößenverteilung der verwendeten Leitfähigkeitsadditive	23
Abb. 14:	Korngrößenverteilung der 3 untersuchten Referenzmaterialien.....	23
Abb. 15:	Kumulative Korngrößenverteilung der 3 Referenzmaterialien	23
Abb. 16:	Intensivmischer SC-5-K der Fa. MAT	24
Abb. 17:	Bestimmung der Marshzeit mittels Auslauftrichter.....	24
Abb. 18:	Bestimmung Suspensionsdichte.....	25
Abb. 19:	Zusammenhang zwischen w/f-Wert (Wasser-/Feststoffgehalt) und Suspensionsdichte.....	25
Abb. 20:	Bestimmung Wasserabsetzmaß	25
Abb. 21:	Abgesetzte Wassermenge nach 3 h.....	25
Abb. 22:	Instationäres Wärmeleitfähigkeitsmessgerät KD2 Pro	26
Abb. 23:	Stationäres Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Taurus TLP900-SG	26
Abb. 24:	Probekörper mit Bohrlöchern für Sonde	27
Abb. 25:	Probekörper während der Wärmeleitfähigkeitsmessung.....	27
Abb. 26:	Aufbau der Messeinheit mit sensorbestückter Messfolie	27
Abb. 27:	Probekörper auf der Messfolie.....	27
Abb. 28:	Styroporverkleidung des Probekörpers	27
Abb. 29:	Erneute Abdeckung des Probekörpers mit sensorbestückter Messfolie	28
Abb. 30:	Abgedeckter Probekörper mit Ausgleichsmatte.....	28
Abb. 31:	Heizplatte auf dem 1. Probekörper	28
Abb. 32:	Druckprüfung mit Prüfstempel	28
Abb. 33:	Probekörper verschiedener Mischungen vor der Druckprüfung	28
Abb. 34:	Einbau des Probekörpers für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes.....	29
Abb. 35:	Eingebauter Probekörper während der Messung.....	29
Abb. 36:	Quecksilberdruckporosimeter PoreMaster der Fa. Quantachrome	30
Abb. 37:	Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit (nass) und Dichte	32
Abb. 38:	Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit (trocken) und Dichte	32
Abb. 39:	Wärmeleitfähigkeit der 28 Tage alten Proben aus dem Normklima unterteilt nach eingesetzten Zusatzstoffen	32
Abb. 40:	Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt nach eingesetzten Zusatzstoffen.....	32
Abb. 41:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und 28 Tage alter Proben aus dem Normklima	33
Abb. 42:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben	33

Abb. 43:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und 28 Tage alte Proben aus dem Normklima aufgeteilt nach Additiven	33
Abb. 44:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben aufgeteilt nach Additiven	33
Abb. 45:	Zusammenhang zwischen der Zugabe von verschiedenen Wärmeleitfähigkeitszusätzen und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen	34
Abb. 46:	Zusammenhang zwischen der Zugabe von verschiedenen Wärmeleitfähigkeitszusätzen und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit im wassergesättigten Zustand	34
Abb. 47:	Zusammenhang zwischen der zugegebenen Trassmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben	34
Abb. 48:	Zusammenhang zwischen der zugegebenen Bentonitmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben	34
Abb. 49:	Zusammenhang zwischen der zugegebenen Trassmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben, unterteilt nach verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditiven	35
Abb. 50:	Zusammenhang zwischen der zugegebenen Bentonitmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben, unterteilt nach verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditiven	35
Abb. 51:	Zusammenhang zwischen Trassgehalt und Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben	35
Abb. 52:	Zusammenhang zwischen Bentonitgehalt und Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben	35
Abb. 53:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben	36
Abb. 54:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Feuchte der Proben nach 28 Tagen Lagerung im Normklima	36
Abb. 55:	Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Basalt	36
Abb. 56:	Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Eisenoxid	36
Abb. 57:	Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Korund	37
Abb. 58:	Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Graphen	37
Abb. 59:	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt mit unterschiedlichen Korundanteilen in der Rezeptur	37
Abb. 60:	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt mit unterschiedlichen Graphenanteilen in der Rezeptur	37
Abb. 61:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben gemessen mit dem Plattenverfahren	38
Abb. 62:	Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von wassergesättigten Proben ermittelt mit 2 unterschiedlichen Messverfahren	39
Abb. 63:	Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von trockenen Proben ermittelt mit 2 unterschiedlichen Messverfahren	39
Abb. 64:	Theoretische Packungsdichteoptimierungsberechnung nach Funk und Dinger mit zugehöriger Partikelgrößenverteilung verschiedener Verteilungsmoduli	40
Abb. 65:	Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie beispielhafter Graphenmischungen	41
Abb. 66:	Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie beispielhafter Korundmischungen	41
Abb. 67:	Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie Diabasmischung	41
Abb. 68:	Beispiele von Musterrezepturen mit kleinen Fehlerquadraten	42

Abb. 69:	Beispiele von Musterrezepturen mit großen Fehlerquadraten	42
Abb. 70:	Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate.....	43
Abb. 71:	Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der trockenen Proben in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate.....	43
Abb. 72:	Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt in verschiedene Wärmeleitfähigkeitsadditive in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate	43
Abb. 73:	Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt in verschiedene Wärmeleitfähigkeitsadditive in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate	43
Abb. 74:	Anteil Porenöffnungsvolumen unterteilt in 3 verschiedene Porengrößenklassen	44
Abb. 75:	Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 32	45
Abb. 76:	Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 73	45
Abb. 77:	REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 32.....	45
Abb. 78:	REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 73.....	45
Abb. 79:	Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 67	46
Abb. 80:	Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 69	46
Abb. 81:	REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 67.....	46
Abb. 82:	REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 69.....	46
Abb. 83:	Porenöffnungsverteilung der wärmeleitfähigen Referenzmischung	47
Abb. 84:	Porenöffnungsverteilung einer Referenzmischung.....	47
Abb. 85:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Proben und dem Gesamtporenvolumen der Mörtelproben	47
Abb. 86:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Proben und dem Anteil des hydraulisch wirksamen Porenvolumens zwischen 8 – 150 µm	47
Abb. 87:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Proben und dem Anteil des hydraulisch nicht wirksamen Porenvolumens < 3 µm.....	47
Abb. 88:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Proben und dem Gesamtporenvolumen der Mörtelproben	47
Abb. 89:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit trockener Proben und dem Anteil des Porenvolumens zwischen 8 – 150 µm	47
Abb. 90:	Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit trockener Proben und dem Anteil des Porenvolumens < 3 µm	47
Abb. 91:	Freifallmischer.....	49
Abb. 92:	Schneckenpumpe	50
Abb. 93:	Mischeinheit	50
Abb. 94:	Fördereinheit.....	50
Abb. 95:	Gemengeaustritt am Pumpenschlauch.....	51
Abb. 96:	Befüllung des Fahrmischers	52
Abb. 97:	Zwangsmischer – horizontaler Einbau.....	53
Abb. 98:	Detailaufnahme des Wirblers.....	53
Abb. 99:	Horizontalmischer HTC 140.....	54
Abb. 100:	Anordnung der Mischwerkzeuge	54
Abb. 101:	Mischer mit Mischgut	56
Abb. 102:	Inhomogene Mischzone hinter dem Wirbler	56

Verzeichnis Tabellen

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit und Dichte bekannter Baustoffe, Luft und Wasser	16
Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeit und Dichte von Baustoffen die zur erhöhten Wärmeleitfähigkeit in den zu entwickelnden Rezepturen eingesetzt werden	17
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Hauptausgangsmaterialien.....	19
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Wärmeleitfähigkeitsadditive	19
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der mineralischen Additive zur Wasserspeicherung	21
Tabelle 6: Durchlässigkeitsbeiwerte für Böden nach DIN EN 18130 (Wasser)	29
Tabelle 7: Ablauf des Mischvorgangs	31
Tabelle 8: Variationsbreite der Hauptkomponenten der verschiedenen Rezepturen	31
Tabelle 9: Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten und trockenen Proben im Vergleich von Platten- und Sondenverfahren	38
Tabelle 10: Ergebnisse der Mischungen mit guten Wärmeleitfähigkeiten, hohen und geringen Fehlerquadraten und dazugehörige Wassergehalte.....	42
Tabelle 11: Einteilung der Poren nach Größe	44
Tabelle 12: Wasserdurchlässigkeitswert spezifischer Mischungen und dazugehöriger Trassgehalt	48
Tabelle 13: ausgewählte Ergebnisse der Mischeruntersuchung.....	55

Zusammenfassung

Inhalt dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines neuartigen hochwärmeleitfähigen Verfüllbaustoffes auf der Basis mineralischer Rest- und Abfallstoffe der Natursteingewinnung und polymermodifizierter Werkstoffsysteme. Die Rezepturentwicklung soll die Applikation von Sekundärrohstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit beinhalten und die puzzolanischen Bindungskapazitäten von Trass und Tuff nutzen. Das Projektziel besteht in der Entwicklung einer praxisingerechten Formulierung des Werkstoffsystems sowie des Verarbeitungsprozesses.

Die Trasswerke Meurin Produktions- und Handelsgesellschaft mbH fördern natürliche Gesteine wie Trass und Tuff. Bei der Gewinnung entsteht ein großer Teil Feinfraktionen für den neue Verwertungslösungen gefunden werden sollen.

Besondere Aspekte waren dabei:

- Erreichen einer konstant hohen Wärmeleitfähigkeit
- Erreichen eines hohen Wasserspeichervermögens
- Verwendung von natürlichen, mineralischen Rohstoffen sowie sekundären Abfallstoffen
- Leichte Verarbeitbarkeit durch Anknüpfen an bestehende Verarbeitungstechnologien, Modifikation herkömmlicher Verarbeitungstechnik

Folgende Effekte wurden im Rahmen der Untersuchungen festgestellt:

Die Feinfraktionen von Trass und Tuff können in einem fließfähigen Verfüllbaustoff eingesetzt werden.

Trass und Tuff bewirken dabei weder eine gesteigerte Wärmeleitfähigkeit noch ein gesteigertes Wasserhaltevermögen. Der zu ersetzende Zement wirkt in den Rezepturen wärmeleitfähigkeitsfördernd, da er durch das Auftreten festigkeitsbildender Phasen eine hohe Packungsdichte erzielt. Das kann durch die Eigenschaften von Tuff/Trass nicht substituiert werden.

Die Wärmeleitfähigkeiten der entwickelten Mischungen liegen in der Höhe der wärmeleitfähigkeitsoptimierten Referenzmaterialien. Geeignete Verfahren zum Mischen und Verfüllen des Materials konnten innerhalb des Projektes erprobt werden. Die bisher entwickelte, für diese Art Verfüllmaterial vorgesehene Maschinenteknik, kann mit der Ausnahme kleiner Modifikationen eingesetzt werden.

Die Anforderungen an das Verpressmaterial, wie in der VDI-Richtlinie 4640 beschrieben, konnten mit Ausnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, erfüllt werden. Da es sich bei Trass um ein Puzzolan handelt, kann der Durchlässigkeitsbeiwert vielleicht zu einem späteren (Erhärtungs)Zeitpunkt erreicht werden. Bei einer puzzolanischen Reaktion handelt es sich um eine langsam ablaufende Reaktion und die Festigkeit steigt über die Zeit sowie auch die Dichtigkeit des Mörtels über die Dauer zunimmt.

Einleitung

Die geschlossene Kreislaufführung und die Gewinnung sowie Rückführung sekundärer Rohstoffe in die Produktion ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Mehr Ressourceneffizienz durch Urban Mining, intelligentes Recycling und Substitution ist deshalb ein wichtiger Beitrag zur Lösung von künftigen Rohstoffproblemen. Um Sekundärrohstoffe tatsächlich noch mehr als alternative Rohstoffquelle zu nutzen und wirkliche Kreislaufwirtschaft zu betreiben, bedarf es neben weitreichenden technologischen Entwicklungen zukünftig immer mehr einer interdisziplinären Herangehensweise. Diesem Trend muss mit innovativer Aufbereitungs- und Trenntechnik sowie intelligenten Verwertungskonzepten entsprochen werden. Hierbei gilt es, innovative Technologien stetig neu- und weiterzuentwickeln und gezielt Hemmnisse zur Umsetzung dieser Technologien in der Praxis abzubauen

Ziel dieses von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts ist die Entwicklung eines Verfüllbaustoffes unter Verwendung von der bei der Natursteingewinnung anfallenden Gesteinsmehle und der ebenfalls nicht verwerteten Überlagerungsmassen (Tuffaschen).

Zur Realisierung dieses Ziels haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Teilvorhaben 1: Werkstoffentwicklung und –untersuchungen

Trasswerke Meurin Produktions- und Handelsgesellschaft mbH

Teilvorhaben 2: Aufbereitung Roh- und Abfallstoffe, Werksmischung und Funktionsmusterfertigung

Während der Bearbeitung des Projektes wurde sich auf die Entwicklung eines Verfüllmaterials für Geothermiebohrungen fokussiert.

In den folgenden Abschnitten werden die Gründe für diese Entscheidung dargelegt.

Hauptteil

1 Stand der Technik

1.1 Erdkabel

Als Bettungsmaterial für Erdkabel kommt Sand, Flüssigboden oder – in Sonderfällen – Magerbeton in Frage. Magerbeton wird z. B. bei Kraftwerkseinleitungen verwendet. Die Entwicklung eines Magerbetons stand nicht im Fokus des Projektes, da das Einbringen von Magerbeton u. U. nicht an allen Standorten im Außenbereich genehmigungsfähig. Der Einsatz auf der freien Strecke ist also nicht durchgehend bzw. nicht uneingeschränkt möglich und Magerbeton wird nur in Sonderfällen genutzt.

Flüssigboden wird unter Verwendung des anstehenden Bodens durch Beimischung von mehreren Zuschlagstoffen (u. a. Zement, Polymere, Tonminerale) und Wasser hergestellt. Ziel ist es, ein Substrat mit geringem Porenvolumen und hohem Wasserhaltungsvermögen herzustellen. Dadurch behält Flüssigboden gute Wärmeleiteigenschaften auch bei höheren Temperaturen. Ein Vorteil von Flüssigboden ist, dass der Bodenaushub weitgehend wieder eingebaut wird und Aushub-Überschüsse gemindert werden. Da die Herstellung von Flüssigboden vergleichsweise aufwändig ist, wird das Material nur dort eingesetzt, wo man mit dem anstehenden Boden oder einer Sandbettung keine ausreichende Wärmeableitung erreicht.

Erdkabel benötigen beim Bau viel Platz. In der Erde liegen die Kabel in mindestens 1,5 Metern Tiefe. Die Grabensohle ist über 1 Meter breit und die Überdeckung der Kabelrohre mit Flüssigboden beträgt mindestens 0,40 Meter und mehr. Die in der Abb. 1 gezeigten Abstandshalter stellen die Füllhöhe des einzusetzenden Flüssigbodens dar. So wurde auf dieser Baustelle von 6- 7 km Länge 16.000 m³ Flüssigboden verbaut. Geht man davon aus das für 1 m³ Flüssigboden 60 kg Zement (3 M.%) benötigt werden wurde allein auf dieser Baustelle 960.000 kg Zement verbraucht.

Auch nur ein teilweiser Ersatz des Zementes durch die Feinfraktion des Trasses bzw. Tuffes ist aus baustellenlogistischer Sicht sowie aus mengenmäßigen Verfügbarkeitsgründen für die Trasswerke Meurin Produktions- und Handelsgesellschaft mbH nicht realisierbar.



Abb. 1: Kabelschächte mit verlegten Erdkabeln und Abstandhaltern während der Verfüllung mit Flüssigboden

Ein weiterer Grund der gegen den Einsatz von Trass im Flüssigboden spricht, ist die Tatsache, dass der Trass ein natürliches Puzzolan ist und im System als Zementersatz dienen sollte. Puzzolanische Stoffe besitzen keine unmittelbaren hydraulischen Eigenschaften, da ihnen ein hierfür notwendiger Mindestgehalt an Calcium fehlt. Wird dem System allerdings Kalk von außen zugeführt, kommt es aufgrund der reaktionsfähigen Bestandteile zur Hydratation unter Bildung festigkeitsbildender Calciumsilicathydrate (C-S-H).

Der für die Reaktion notwendige Kalk entsteht im System mit Portlandzement bei der Hydratation der silicatischen Klinkerphasen. Hierbei bilden sich neben den für die

Zementsteifigkeit verantwortlichen C-S-H-Phasen größere Mengen Ca(OH)_2 in Form von Portlandit, die das Zementsteingefüge empfindlich stören. Vor allem die gute Spaltbarkeit des Portlandits und die erhöhte Kapillarporosität entlang seiner Korngrenzen wirken sich hemmend auf die Festigkeit bzw. Dauerhaftigkeit des Portlandzements aus, weswegen ein Abbau dieser Komponente unter Bildung zusätzlicher C-S-H-Phasen infolge der puzzolanischen Reaktion erstrebenswert ist [1, 2].

Befindet sich im System (Flüssigboden) jedoch nur ein sehr geringer Anteil von Zement (< 3 M%) bzw. Kalk kommt es auch nicht zum Ablauf einer puzzolanischen Reaktion und keine zusätzlichen C-S-H-Phasen können gebildet werden. Die puzzolanische Reaktionsfähigkeit des Trasses bleibt ungenutzt.

Aus diesem Grund fokussierte sich der Forschungsschwerpunkt während des Projektes auf Erdwärmesondenkontaktmörtel.

1.2 Erdwärmesondenkontaktmörtel

Der rasante Anstieg der Energiekosten in den letzten Jahren führte zum Boom im Bereich der oberflächennahen Geothermie in Deutschland. Noch immer werden dafür geeignete Verfüllmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit gesucht.

Durch die VDI 4640 [3] ist den bauausführenden Gewerken eine Richtlinie in die Hand gegeben, die dieser Entwicklung Rechnung trägt. Es wird darin festgestellt, dass sich in der Praxis Bentonit/HOZ(Hochofenzement)/Wasser- oder Bentonit/HOZ/Sand/Wasser-Suspensionen als Wärmesondenkontaktmörtel bewährt haben, welche vornehmlich im Kontraktorverfahren in den Ringraum zwischen Erdwärmesonde und Erdreich verpresst werden. Der Kontaktmörtel soll nach dem Erhärten im Wesentlichen zwei Funktionen übernehmen: Die Wärmeübertragung zwischen Erdreich und Erdwärmesonde und die Abdichtung der hydrogeologischen Trennschichten.

Im Rahmen der Forschungstätigkeit wurden die in den Bundesländern relevanten Richtlinien und Vorschriften gesichtet und anhand der Erkenntnisse aus den eigenen Untersuchungen bezüglich der Wärmesondenkontaktmörtel bewertet.

Folgende Einbaueigenschaften sind einzuhalten:

- Suspensionsstabilität (Wasserabsetzmaß)
- Mindestdichte der Baustoffsuspension
- Fließfähigkeit (Trichterauslaufzeit/Marshzeit).

Durch diese sind die gewünschten Endprodukteigenschaften wie:

- Druckfestigkeit
- Volumenstabilität
- Wärmeleitfähigkeit
- Durchlässigkeitsbeiwert zu erzielen.

1.2.1 Bautechnische Anforderungen an Verpressmörtel für Wärmesonden

Die Anforderungen an das Verpressmaterial werden in der VDI-Richtlinie 4640 [3] beschrieben. Darenin heißt es auf den Seite 25-26:

"Eine schlüssige Verfüllung des Ringraumes ist nur gewährleistet, wenn die Bohrung von unten nach oben mit einer geeigneten Suspension verpresst wird. Diese muss nach der Aushärtung eine dichte und dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Erdwärmesonde in das umgebende Gestein gewährleisten. Lufteinschlüsse und Hohlräume sind unter allen Umständen zu vermeiden. [...]"

Die VDI-Richtlinie 4640 schlägt eine Bentonit/HOZ/Sand/Wasser-Rezeptur vor: 10 Ma.-% Bentonit, 10 Ma.-% Zement, 30 Ma.-% Sand. Der restliche Anteil von 50 Ma.-% besteht folglich aus Wasser, was einen w/f-Wert von 1,0 ergibt.

"Die Zugabe von Quarzsand kann einen höheren Verschleiß der Verpresspumpen bewirken. Die Zugabe von Quarzmehl statt Quarzsand ist ebenso möglich wie das Verpressen mit reinen Bentonit/HOZ/Wasser-Suspensionen, die dann im Verhältnis von z.B. 25/25/50 Gew.-% zusammengestellt werden. Statt Bentonit können hier auch andere quellende Tone oder gemahlene Tonsteine in Betracht kommen."

Diese sehr rudimentären Anforderungen und Empfehlungen werden in den Leitlinien zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden der einzelnen Bundesländer weiter konkretisiert. Diese bilden in der Regel die Entscheidungs- bzw. Bewilligungsgrundlage der jeweiligen Behörden für den Bau von Erdwärmesonden.

Als besonders hilfreiche Leitlinie gilt gemeinhin die des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg. In der Leitlinie Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS, Stand Dezember 2018) werden konkrete Anforderungen an den Baustoff aufgeführt. So sind an alle Baustoffe (d. h. werkseitig hergestellte Fertigbaustoffe und Eigenmischungen) die gleichen Materialforderungen zu stellen.

Es muss ein Nachweis erbracht werden für:

- 1) Wasser/Feststoff-Wert
 - dient der Einhaltung der Rezeptur des Herstellung und wird über die Suspensionsdichte lediglich kontrolliert
- 2) Suspensionsdichte
 - muss $0,3 \text{ g/cm}^3$ größer sein als die Bohrspülung und kann durch Spülungswaage, Aräometer oder Wägung eines definierten Volumens ermittelt werden
- 3) Suspensionsstabilität
 - wird in einen 1000 ml Zylinder ermittelt, indem das Wasserabsetzmaß nach 3 Stunden gemessen wird, welches nicht größer als 2,0 Vol.-% betragen sollte
- 4) Rheologie
 - deren Beurteilung erfolgt über die Trichterauslaufzeit (1 l Suspension bei einem Marshtrichter mit 4,76 mm Auslauf) nach DIN 4126, welche bei einer Marshzeit von 50 - 100 s liegen sollte, um als gut eingeschätzt werden zu können
- 5) Druckfestigkeit
 - muss mindestens 1 N/mm^2 betragen (spätestens nach 28 Tagen), um einen Ringspalt am Sondenrohr während der Druckbeaufschlagung zu verhindern
- 6) Hydratationswärme
 - darf unter adiabatischen Bedingungen nicht 50°C übersteigen, damit die Sonde nicht beschädigt wird
- 7) Wärmeleitfähigkeit
 - sollte mindestens so hoch sein wie das umgebende Gestein (Standardverfüllbaustoffe $0,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und optimierte Verfüllbaustoffe $2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)
- 8) Durchlässigkeit
 - der k_f -Wert muss dauerhaft $\leq 1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ sein VDI 4640 Blatt 2 (2015)

2 Wärmeleitfähigkeit

Unterliegen Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase unterschiedlichen Temperaturen findet ein Wärmefluss in Richtung der geringeren Temperatur statt.

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein Maß für die Wärmeenergie, die bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin innerhalb von einer Stunde durch einen Stoff mit einer Fläche von 1 m² und einer Dicke von 1 m transportiert wird. Dieser Wärmefluss ist je Stoff unterschiedlich und wird mit der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ausgedrückt.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit geben einen Überblick für übliche Produkte des Bauwesens, sowie für Luft und Wasser.

Der Wärmetransport im Boden findet durch Korn-Korn-Kontakte (Konduktion), Wassertransport in flüssiger oder dampfförmiger Phase (Konvektion) oder über Wärmestrahlung statt.

Die Wärmeleitfähigkeit ist dabei stark von der Art und dem Anteil der Feststoffpartikel, dem Wassergehalt, der Saugspannung des Bodens, der Temperatur des Bodens durch die Erwärmung durch Rohre oder Kabel und den äußeren Einflüssen (jahreszeitlicher Temperaturverlauf, Niederschlag, Druck durch z.B. Auflast) abhängig.

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit und Dichte bekannter Baustoffe, Luft und Wasser

Stoff	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Beton	~2500	2,1
Zementestrich	~2000	1,4
Kalkzementputz	~1500	1,0
Sand (trocken)	~2600	0,6
Kalkstein	2000 - 2500	2,5
Epoxidharzmörtel mit 85% Quarzsand	~2000	1,2
Luft (in Meeresspiegelhöhe)	~1,2	0,03
Wasser	997	0,6

Die Wärmeleitfähigkeit wird im Wesentlichen von der Rohdichte beeinflusst, die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten liegen bei Stoffen mit einer Rohdichte zwischen 20 kg/m³ und 100 kg/m³ vor. Niedrigere Rohdichten führen aufgrund eines höheren Konvektions- und Strahlungsanteils im Porenraum zu geringfügigen Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit. Bei höheren Rohdichten führt die Wärmeleitung des Feststoffanteils zu einem deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Stoffes [4].

Die Luft in den Poren weist mit nur 0,026 W/(mK) eine geringere Wärmeleitfähigkeit als der Feststoffanteil der Matrix auf, weshalb hohe Porositäten die Wärmeleitfähigkeit des Betons/Mörtels maßgeblich reduzieren. Porenform und -größe sowie die Homogenität des Porengefüges beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls, wobei gleichmäßig verteilte runde Poren mit einem Durchmesser von unter 300 µm positiv auf eine geringe Wärmeleitfähigkeit wirken [5].

2.1 Lösungsansätze zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit

Innerhalb des Projektes sollte durch gezielte materialtechnische Entwicklungen Effizienzsteigerungen des Verfüllmaterials realisiert werden. Die Entwicklung zielte deshalb auf ein thermisch optimiertes Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit und hohem Wasserspeichervermögen ab.

In der Literatur finden sich verschiedenste Theorien die Wärmeleitfähigkeit von zementären Systemen wie Erdwärmesondenkontaktmörtel oder Flüssigböden zu erhöhen.

Eine erhöhte thermische Leitfähigkeit soll durch eine hohe Packungsdichte, großes Größtkorn, hohen Zementgehalt, geringen Anteil quellfähiger Tone und hohen Anteil Gesteinskörnungen und wenig Bodenaushub erreicht werden.

Dies steht teilweise im Widerspruch zu Vorgaben aus den Richtlinien für Baustoffe zum Verfüllen von Erdwärmesonden-Bohrungen mit z.B. vorgegebenen:

- Trichterauslaufzeiten von 50 -100 s bei einem 4,76 mm Auslauf mit Sieb (gegenläufig zu großem Größtkorn)

oder

- Wiederaushubfähigkeit des Materials (Wiederaushubfähigkeit $\leq 1,4$ N/mm², gegenläufig zu hohem Zementgehalt).

2.1.1 Additive zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit

Die durchgeführte Literaturrecherche ergab die in Tabelle 2 zusammengefassten Kennwerte möglicher Additive zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit.

Für die Zugabe zum Mörtelsystem wurden diejenigen Materialien ausgewählt, die:

- auf Grund eines hohen Kennwertes der Wärmeleitfähigkeit ein hohes Steigerungspotential für den Verfüllbaustoff versprechen,
- eine gute wirtschaftliche Verfügbarkeit und eine einfache Anwendbarkeit / Verarbeitungsverhalten aufweisen
- keine Gefahr- oder Schadstoffe oder Hemmnisse im Sinne eines späteren Recyclings darstellen.

Materialien die im trockenen Zustand erhöhte Wärmeleitfähigkeiten aufweisen:

- Leitfähigkeitsgraphen
- Eisenoxid
- Siliciumcarbid
- Korund
- Basalt

Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeit und Dichte von Baustoffen die zur erhöhten Wärmeleitfähigkeit in den zu entwickelnden Rezepturen eingesetzt werden

Baustoff	Dichte [kg/cm ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Basalt (Gestein)	2700 - 3000	~3,5
Eisenoxid	~5200	80,2
Graphen	~2260	5300 \pm 480
Edelkorund	~4000	~42
Mischkorund	~3900	~42
Siliciumcarbid (rein)	~3210	~350

Im Vergleich zum Quarz, dessen Wärmeleitfähigkeit mit 1,4 W/mK angegeben wird, weisen Partikel aus Eisen, Korund, Kohlenstoff oder Siliciumcarbid bereits um den Faktor 30 – 250 deutlich gesteigerte Kennwerte im Bereich von 40 bis 350 W/mK auf. Die Stoffgruppe der Graphene, als Monolayerschichtmaterialien des Graphites stellt das Maximum der erreichbaren Wärmeleitfähigkeit dar. Mit Kennwerten von etwa 5300 W/mK übertreffen die Derivate des Kohlenstoffes die mineralischen Substrate um das 4000fache (Tabelle 2).

2.1.2 Additive mit Wasserspeichervermögen

Eine andere mögliche Option zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit stellt die Verhinderung/Verminderung des Austrocknens des Bodenmörtels dar, da die Wärmeleitfähigkeit

eines trockenen Bodens um ein deutliches geringer ist als die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Bodens. Geht man bei einem Boden von einem Dreiphasensystem aus Feststoff, Wasser und Luft aus, trocknen durch die gesteigerte Wasserhaltefunktion des Bodens die Poren nicht oder langsamer aus. Die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtsystems liegt bei wassergefüllten Poren damit höher als bei Luftporen, da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser zwar gering ist aber um das 20fache über der Wärmeleitfähigkeit von Luft liegt (Tabelle 1).

Mögliche Materialien zur Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens bzw. des Wasserhaltevermögens sind:

- Trass
- Bentonit
- Cellulose
- Celluloseether
- Stärkeether

3 Ausgangsmaterialien

3.1 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

Die Untersuchungen beschränkten sich auf einen CEM III/B 42,5 mit einem Hüttensandanteil zwischen 66 und 88 M. %. Die Vorteile eines CEM III/B liegen bei einer niedrigen Hydratationswärmeentwicklung, hohem Sulfatwiderstand und einer hohen Endfestigkeit. Als Einsatzgebiet wird Beton bei Sulfatangriff durch Grundwasser und Boden empfohlen, welches auch auf das zu entwickelnde Verfüllmaterial zutrifft.

Bei dem eingesetzten Sand handelt es sich um einen kalk- und kaolinfreien Quarzsand der Korngröße 0,1 – 0,35 mm und einer Schüttdichte von 1460 kg/m³.

Zusätzlich wurden Versuche mit Vorwärmerkalk durchgeführt. Bei Vorwärmerkalk handelt es sich um den Filterstaub der bei der Zementklinkerherstellung in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern anfällt. Vorwärmerkalk kann nicht immer vollständig dem Zementmehl zugemischt werden, denn er enthält häufig Stoffe wie z.B. Chloride die die Zementqualität im negativen Sinne beeinflussen. Der Einsatz als hydraulisches Bindemittel zur Bodenverfestigung und Bodenverbesserung ist jedoch möglich. Der Vorwärmerkalk ist somit ein Rest- und Anfallstoff und diente für die durchgeführten Versuche als Calciumhydroxidquelle für eine Anregung möglicher puzzolanischer Reaktionen des Trassmehles.

In den Tabelle 3 und Tabelle 4 ist die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Ausgangsmaterialien aufgelistet.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Hauptausgangsmaterialien

	CEM III/B, 42,5N	Sand	Vorwärmerkalk
SiO₂	26,2	98,0	11,6
Al₂O₃	10,1	1,4	3,1
Fe₂O₃	1,40	1,2	1,4
CaO	48,8	<0,01	41,00
MgO	6,04	<0,01	0,90
K₂O	0,66	<0,01	19,30
SO₃	4,71	<0,01	7,50
TiO₂	1,08	<0,10	0,10
Na₂O	0,34	<0,01	0,30
Cl	0,11	<0,01	8,00
SiC			
GV 1025°C	0,00	0,00	

Das eingesetzte Leitfähigkeitsgraphen wurde von der Fa. Graphite Kropfmühl AG untersucht, der Kohlenstoffgehalt wird bei diesem Material mit > 99 M. % angegeben.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Wärmeleitfähigkeitsadditive

	Leitfähig- keits- graphen*	Silicium- carbid*	Eisenoxid	Edel- korund*	Misch- korund*	Basalt- füller
SiO₂			0,95	0,02	11,60	44,30
Al₂O₃			0,37	99,81	80,10	15,10
Fe₂O₃			96,6	0,04	0,20	11,00
CaO			0,20	<0,01	1,60	11,40
MgO			0,10			6,19
K₂O			0,02			3,83
SO₃			0,07			0,03
TiO₂			0,02	0,04	0,70	2,62
Na₂O			0,08	0,11		3,95
Cl						
SiC		>95,00			5,80	
GV 1025°C			+7,63			0,35

Bei mikroskopischer Betrachtung (Abb. 2 bis Abb. 7) der Wärmeleitfähigkeits-Additive werden die Unterschiede in Kornform und Korngrößenverteilung sichtbar. Besonders deutlich zeigen sich die Unterschiede bei dem Wärmeleitfähigkeitsgraphen verglichen zu allen anderen Aufnahmen.

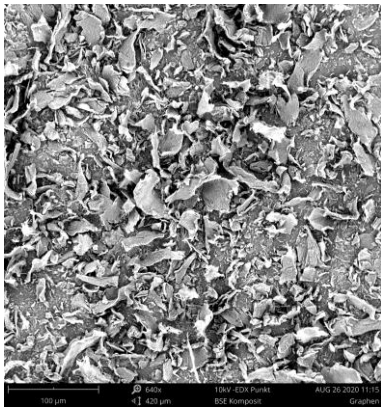


Abb. 2: REM Aufnahme des pulverförmigen Graphens

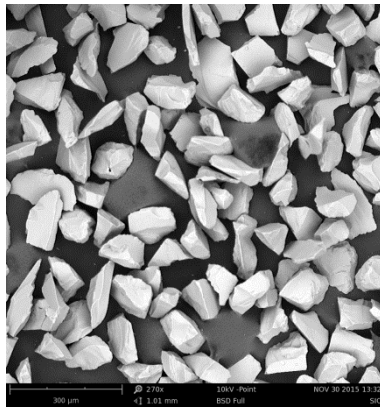


Abb. 3: REM Aufnahme des pulverförmigen Siliciumcarbids

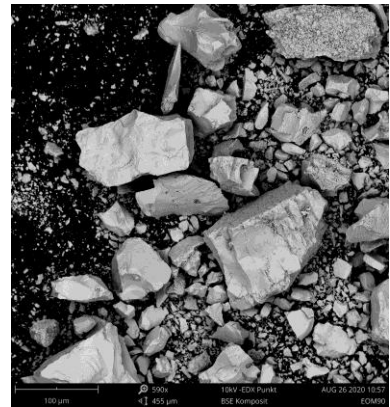


Abb. 4: REM Aufnahme des pulverförmigen Eisenoxids

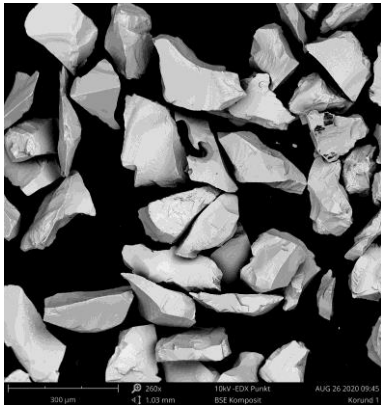


Abb. 5: REM Aufnahme des pulverförmigen Edelmetalls



Abb. 6: REM Aufnahme des pulverförmigen Mischkorunds

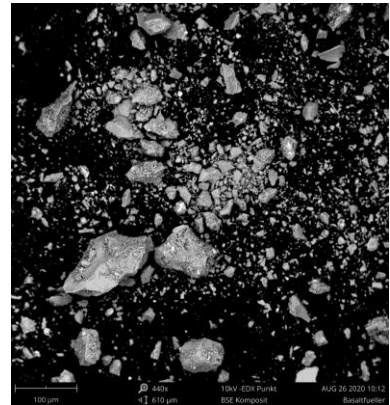


Abb. 7: REM Aufnahme des pulverförmigen Basaltfüllers

Bei dem in den Versuchen verwendeten Trass handelt es sich um die bei der Tuffsteingewinnung entstehende Feinfraktion der Trasswerke Meurin Produktions- und Handelsgesellschaft mbH. Weiterhin wurde für eine große Anzahl der Versuche ein Calciumbentonit zur Steigerung der Wasseraufnahmefähigkeit des Füllmaterials eingesetzt. Bei Bentonit handelt es sich um ein smektitisches Tonmineral. Verglichen mit Natriumbentonit zeigt das eingesetzte Calciumbentonit nur eine mäßige bis gute Quellfähigkeit. Versuche mit einem Natriumbentonit zeigten negative Auswirkungen auf die Rheologie und wurden deshalb nicht weiter verfolgt.

In Tabelle 5 ist die chemische Zusammensetzung von Trass und dem eingesetzten Calciumbentonit aufgeführt. Diese beiden mineralischen Komponenten sowie Stärkeether, Cellulosepulver und Celluloseether wurden bei Versuchen zur Steigerung der Wasseraufnahmefähigkeit getestet.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der mineralischen Additive zur Wasserspeicherung

	Trass	Bentonit
SiO₂	54,8	57,6
Al₂O₃	18,2	21,1
Fe₂O₃	4,91	5,90
CaO	4,09	1,78
MgO	1,35	2,96
K₂O	6,53	1,75
SO₃	0,16	0,04
TiO₂	0,67	0,49
Na₂O	3,57	0,37
Cl		
SiC		
GV 1025°C	5,10	7,79

Tonmineral und Trass zeigen in den mikroskopischen Aufnahmen Unterschiede in der Kornform und Korngrößenverteilung (Abb. 8 und Abb. 9). Das Bentonit zeigt einen eher plattigen Aufbau während bei dem Trass viele sehr feine Partikel zu erkennen sind. Bei stärkerer Vergrößerung zeigt das Trasspulver bei den feinen Partikeln eine poröse Struktur, während bei dem Tonmineral ein eher plattiger Aufbau zu erkennen ist (Abb. 10 und Abb. 11).

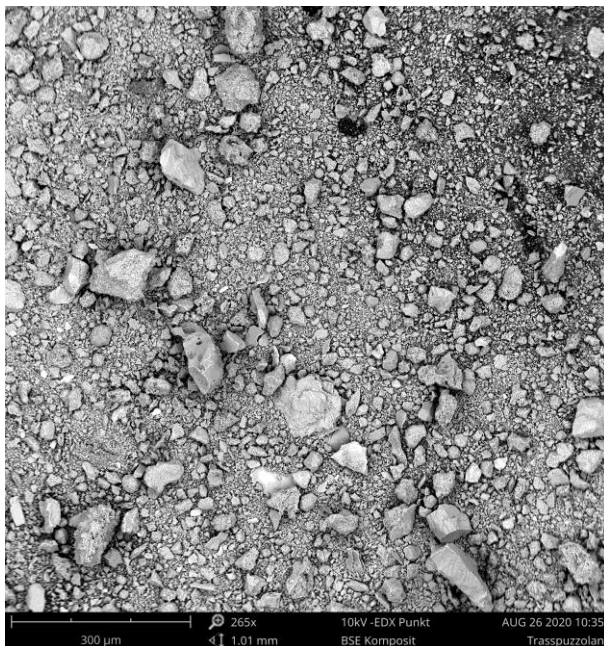


Abb. 8: REM Aufnahme des Trasspuffers bei 265er Vergrößerung

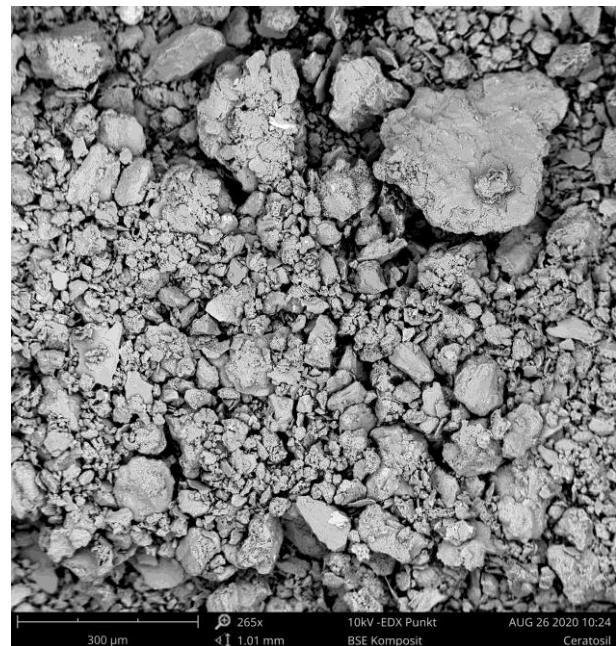


Abb. 9: REM Aufnahme des Calciumbentonites bei 265er Vergrößerung

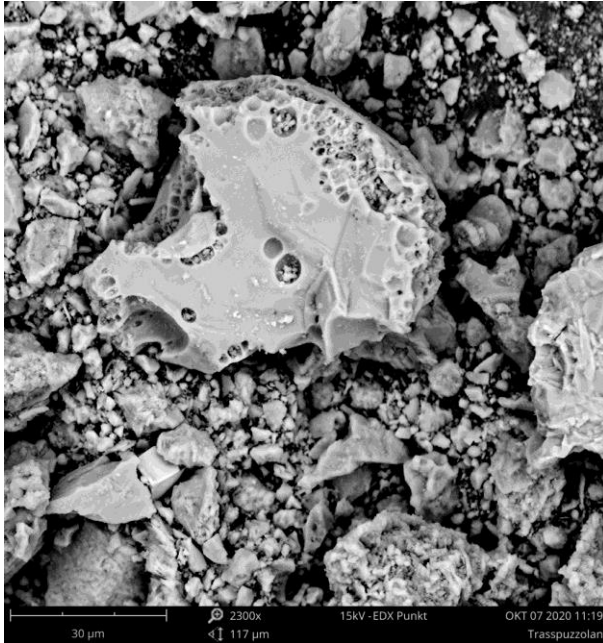


Abb. 10: REM Aufnahme der Oberflächenstruktur des Trasses

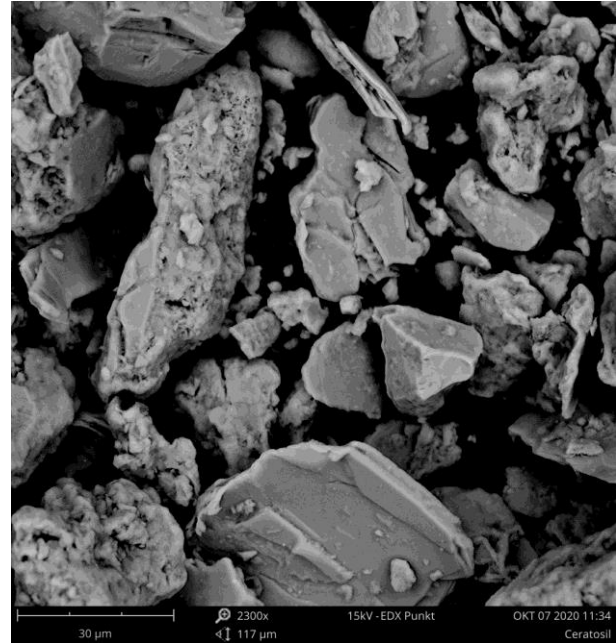


Abb. 11: REM Aufnahme der Oberflächenstruktur des Calciumbentonits

Weiterhin wurde der Einsatz von Cellulose, Celluloseether und Stärkeether einzeln getestet. Der Einsatz von 0,3 – 1,0 % der Zusatzstoffe zeigte deutliche Effekte auf die Rheologie. Die Trichterauslaufzeit stieg deutlich an und lag nicht mehr im Rahmen der VDI-Richtlinie 4640. Gleiche Effekte ließen sich auch mit dem mineralischen Bentonit erfüllen, weshalb man sich bei den folgenden Versuchen auf den Einsatz von Bentonit fokussierte.

3.2 Korngrößenanalyse

Die Korngrößenverteilung wird als Mengenanteil in % der Gesamtmasse von Siebdurchgängen („Sieblinie“) oder als Volumenanteil in % des Gesamtvolumens bestimmt. Diese wird als Diagramm dargestellt, in dem die Massen- oder volumetrischen Anteile der Körnung bzw. aller granularen Stoffe (Zement, Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe) abgebildet sind.

Die mittels Lasergranulometrie bestimmten Korngrößenverteilungen zeigen als Volumenanteil in % die Abb. 12 und Abb. 13.

Bei dem eingesetzten Feinsand handelt es sich um ein mehlkornfreies Produkt (Abb. 12). CEM III/B, Vorwärmerkalk, Trass und Bentonit liegen im Korngrößenbereich vom Mehlkorn < 125 µm, wobei im Partikelgrößenbereich zwischen 63 µm und 125 µm höhere Anteile bei Bentonit, Trass und Vorwärmerkalk im Vergleich zum Zement vorliegen.

Die für das Leitfähigkeitsgraphen ermittelten Werte stimmen mit denen der Herstellerangaben überein. Die REM-Aufnahmen zeigen eine abweichende Kornform im Vergleich zu allen anderen eingesetzten Additiven, mit möglichen Auswirkungen auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch der Mischungen.

Die Wärmeleitfähigkeitsadditive kann man in mehlkornfeine Pulver und in Partikel > 125 µm einteilen (Abb. 13). Das Siliciumcarbid besitzt eine sehr geringe Korngröße, der Basaltfüller entspricht schon eher der Verteilung des eingesetzten Sandes mit hohem Anteil an Mehlkorn.

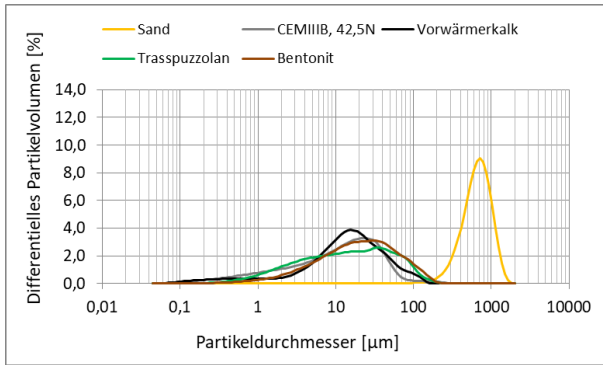


Abb. 12: Korngrößenverteilung der verwendeten Ausgangsstoffe

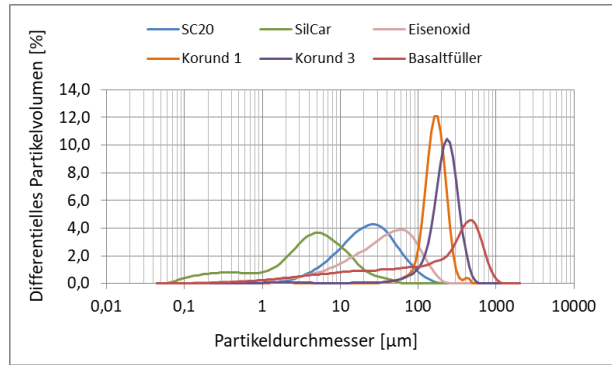


Abb. 13: Korngrößenverteilung der verwendeten Leitfähigkeitsadditive

3.3 Referenzmaterial

Parallel zu den entwickelten Mischungen wurden alle Versuche an 3 Vergleichsmaterialien durchgeführt. Die untersuchten Baustoffe wurden nach Herstellerangaben angemischt und durchliefen den identischen Versuchsablauf wie die hergestellten Eigenmischungen. Bei 2 der Materialien handelte es sich um nicht-thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe, das 3. Material war ein thermisch verbesserter Verfüllbaustoff. Abb. 14 und Abb. 15 zeigen die Korngrößenverteilungen der 3 Vergleichsmaterialien. Der thermisch verbesserte Baustoff unterscheidet sich von den 2 anderen Materialien, welche sehr ähnliche Verteilungen aufweisen, durch größere Partikel im Bereich zwischen 80 und 400 μm .

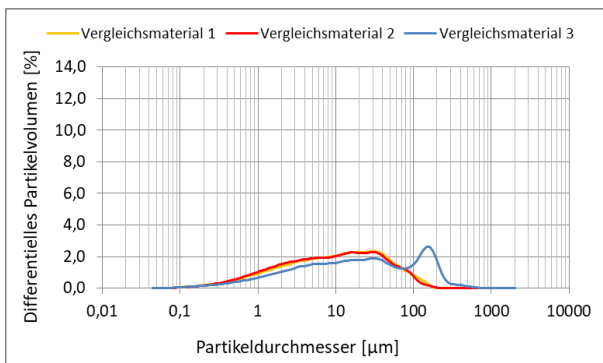


Abb. 14: Korngrößenverteilung der 3 untersuchten Referenzmaterialien

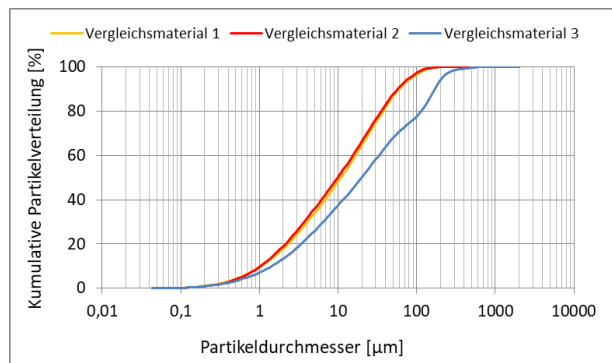


Abb. 15: Kumulative Korngrößenverteilung der 3 Referenzmaterialien

4 Messprogramm

4.1 Messungen an der Suspension

Zum Mischen der Suspension wurde ein Intensiv-/Suspensionsmischer der Fa. MAT (Abb. 16) und Trinkwasser aus der Leitung verwendet. Im Intensivmischer wurden 1,5 kg bis 5 kg Verfüllbaustoff in 50 s angemischt.



Abb. 16: Intensivmischer SC-5-K der Fa. MAT

An allen Rezepturen wurde nach dem folgenden Versuchsschema Untersuchungen vorgenommen.

Reihenfolge der Versuchsdurchführung:

- Marshtrichter - Rheologie
- Temperatur - Hydratationswärme
- Dichtetopf - Suspensionsdichte
- Absetzmaß - Suspensionsstabilität

Die Bestimmung der Trichterauslaufzeit erfolgte mittels Marshtrichter (1 l Suspension bei einem Marshtrichter mit 4,76 mm Auslauf und Sieb) nach DIN 4126 an allen Suspensionsrezepturen (Abb. 17). Das Maß der Auslaufzeit bildete das Kriterium für das weitere Vorgehen. Nur Suspensionen mit gutem Fließverhalten wurden für die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit ausgewählt. Bei zähflüssigen Suspensionen wurde der Versuch nach spätestens 2,5 min abgebrochen.

Die ermittelten Suspensionstemperaturen schwankten zwischen 16,1°C und 31,2°C auch in Abhängigkeit der örtlichen Labortemperatur.



Abb. 17: Bestimmung der Marshzeit mittels Auslauftrichter

In dem vorliegenden Versuchen wurde die Suspensionsdichte in einen Gefäß/Dichtetopf mit bekanntem Volumen in Anlehnung an DIN EN 1015-6 durch Wägung ermittelt. Das Gefäß wurde mit der Suspension gefüllt, das überstehende Material abgezogen, der Topf außen sorgfältig gesäubert und anschließend gewogen.

Die Suspensionsdichte ist im wesentlich abhängig vom eingestellten w/f-Wert (Abb. 19).



Abb. 18: Bestimmung Suspensionsdichte

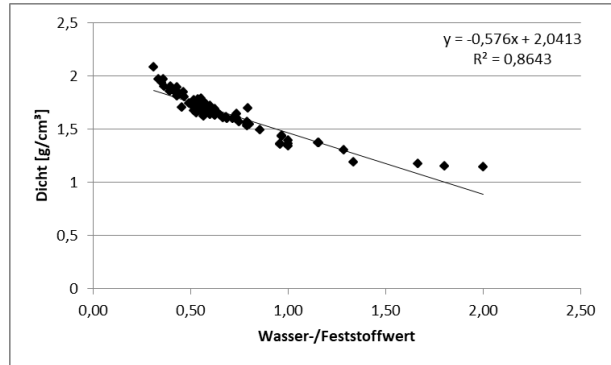


Abb. 19: Zusammenhang zwischen w/f-Wert (Wasser-/Feststoffgehalt) und Suspensionsdichte

Als weiterer Parameter wurde die Suspensionsstabilität anhand des Wasserabsetzmaßes nach 3 Stunden bestimmt. Dazu wurde ein 250 ml-Messzylinder mit der Suspension gefüllt, abgedeckt und das nach 3 Stunden abgesetzte Wasservolumen wurde abgelesen und auf das Gesamtvolumen bezogen (Abb. 20 und Abb. 21).



Abb. 20: Bestimmung Wasserabsetzmaß



Abb. 21: Abgesetzte Wassermenge nach 3 h

Die fertige, im Intensivmischer gemischte Suspension wurde im letzten Schritt in verschiedene Formen gegossen, um die Druck- und Biegezugfestigkeit (40x40x160 mm Prismen), Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit (Zylinder oder 5 cm hohe Platten aus 10er Würfeln gesägt) und Wasserdurchlässigkeit zu bestimmen. Das Ausschalen konnte erst erfolgen, wenn die Prüfkörper eine ausreichende Festigkeit aufwiesen. Dieser Zeitpunkt variierte von Mischung zu Mischung.

Optional:

- Zylinder für Wärmeleitfähigkeit
- Würfel für Wärmeleitfähigkeit
- Prismen für Druck- und Biegezugfestigkeit
- Zylinder für Wasserdurchlässigkeit

Für die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung wurden 2 verschiedene Verfahren genutzt. Die instationäre Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit dem Messgerät KD2 Pro (Abb. 22) und die stationäre Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit dem Messgerät Taurus TLP900-SG (Abb. 23).



Abb. 22: Instationäres Wärmeleitfähigkeitsmessgerät KD2 Pro



Abb. 23: Stationäres Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Taurus TLP900-SG

4.2 Instationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung

Das instationäre Messverfahren wurde mit dem Gerät KD2 Pro der Fa. DECAGO DEVICES durchgeführt und kam bei 42 Mörtelproben zum Einsatz (Abb. 22). Hierbei wird der Messkörper durch eine Linienquelle erhitzt und die Temperaturänderung in unmittelbarer Nähe der Heizquelle in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet.

Die Messungen wurden an zylinderförmigen Probekörpern von 10 x 14 cm durchgeführt. Pro Probekörper wurden 3 Bohrungen für die Sonden gesetzt und somit pro Probekörper 3 Wiederholungsmessungen durchgeführt (Abb. 24 und Abb. 25). Weiterhin erfolgte die Messung bei 4 verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten nach 28 Tagen direkt aus dem Normklima, wassergesättigt (Wasserlagerung bis Massekonstanz), trocken (Trocknung bei 105°C bis Massekonstanz) und an einem Zeitpunkt zwischen Normklima und Wassersättigung.



Abb. 24: Probekörper mit Bohrlöchern für Sonde



Abb. 25: Probekörper während der Wärmeleitfähigkeitsmessung

4.3 Stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung

Mit dem TLP 900-SG der Firma Taurus steht am IAB ein stationäres Messgerät für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Zwei-Platten-Verfahren zur Verfügung. Der Messbereich des Gerätes wird vom Hersteller von $0,010 \text{ W/mK}$ bis $2,0 \text{ W/mK}$ angegeben. Beim Zweiplatten-Verfahren werden die beiden plattenförmigen Probekörper liegend ober- und unterhalb der mittig angeordneten Heizplatte platziert (Abb. 26 und Abb. 31). Zum Vermeiden eines unkontrollierten Wärmeüberganges werden die Probekörper am seitlichen freien Rand mit einem Rahmen aus Styropor verkleidet (Abb. 28). Über die auf den jeweiligen flachen Außenseiten aufgelegten sensorbestückten Messfolien kann der sich einstellende Wärmefluss von der Heizplatte durch die Schichtdicke des Materials registriert werden. Der Aufbau im Messgerät oberhalb der Heizplatte ist identisch zur Abbildungsreihenfolge Abb. 26 bis Abb. 30.

Die Wärmeleitfähigkeit der Prüfkörper wurde in zwei verschiedenen Zuständen geprüft: trocken und wassergesättigt. Erwartungsgemäß zeigten sich dabei Unterschiede hinsichtlich der Messergebnisse.

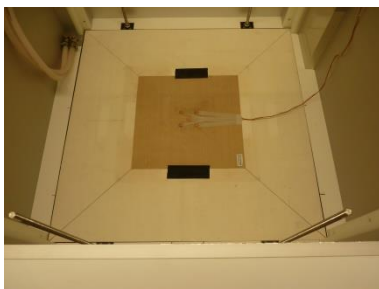


Abb. 26: Aufbau der Messeinheit mit sensorbestückter Messfolie

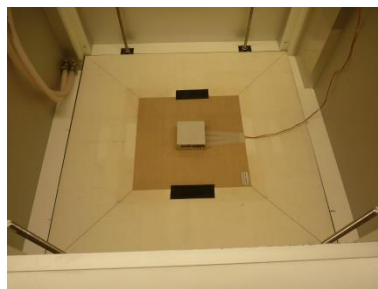


Abb. 27: Probekörper auf der Messfolie

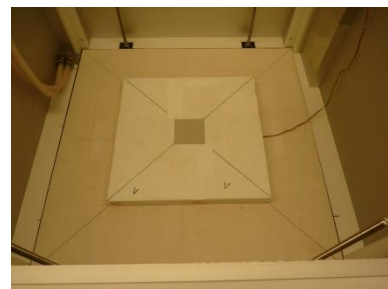


Abb. 28: Styroporverkleidung des Probekörpers

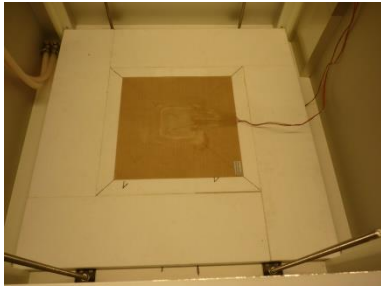


Abb. 29: Erneute Abdeckung des Probekörpers mit sensorbestückter Messfolie



Abb. 30: Abgedeckter Probekörper mit Ausgleichsmatte



Abb. 31: Heizplatte auf dem 1. Probekörper

4.4 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde, angelehnt an die DIN EN 196-1, bei 40 Rezepturen nach 28 Tagen Normklima an Normprismen der Größe 40 x 40 x 160 mm bestimmt (Abb. 32). Dabei schwanken die Werte zwischen 3,3 N/mm² und 13,6 N/mm² und liegen bei allen Rezepturen über dem geforderten Wert von > 1 N/mm². Teilweise zeigen die Probekörper in Abb. 33 eine grünliche Färbung im Kern. Dies ist auf den Einsatz des CEM III zurückzuführen. Der hütensandhaltige Zement enthält geringe Mengen an Sulfiden, die unter Luftabschluss zu blaugrünlich gefärbten Metallsulfiden reagieren. Bei Luftzutritt oxidieren diese Metallsulfide durch den Luftsauerstoff zu farblosen Metallverbindungen, die Färbung geht zurück. Die grünlichen Kerne deuten in den Versuchen auf eine dichtere Mischung hin.

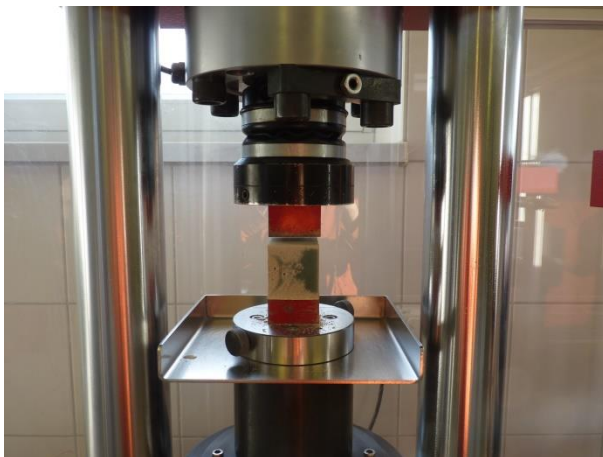


Abb. 32: Druckprüfung mit Prüfstempel



Abb. 33: Probekörper verschiedener Mischungen vor der Druckprüfung

4.5 Wasserdurchlässigkeit

Die Permeabilität K wird in der Geotechnik zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von Böden und Fels für Flüssigkeiten oder Gase benutzt. Mit ihr sehr eng verbunden ist der hier gleichzeitig erläuterte Durchlässigkeitsbeiwert k_f .

Die Durchlässigkeit von Böden/Mörteln hängt in erster Linie von ihrer Porosität ab (Tabelle 6). Die Porosität von Böden/Mörteln wiederum hängt von den Korngrößen, ihrer Verteilung und damit vom Porenvolumen des Bodens/Mörtels ab.

Durchlässigkeit und Durchlässigkeitsbeiwert quantifizieren in ähnlicher Weise die Fließrate Q durch ein durchlässiges Medium in Abhängigkeit von der Druckdifferenz Δp , unterschiedlich sind nur ihre Einheiten:

- bei der Durchlässigkeit ist es eine Fläche (m^2)
- beim Durchlässigkeitsbeiwert ist es eine Geschwindigkeit (m/s) (Abb. 34 und Abb. 35).

Tabelle 6: Durchlässigkeitsbeiwerte für Böden nach DIN EN 18130 (Wasser)

Durchlässigkeitsbeiwert	Einteilung
$>10^{-2}$ m/s	sehr stark durchlässig
10^{-2} bis 10^{-4} m/s	stark durchlässig
10^{-4} bis 10^{-6} m/s	durchlässig
10^{-6} bis 10^{-8} m/s	schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-9} m/s	sehr schwach durchlässig
$< 10^{-9}$ m/s	nahezu völlig wasserundurchlässig

Nach der VDI-Richtlinie 4640 wird ein Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s für den Verfüllbaustoff gefordert, was laut DIN EN 18130 als sehr schwach durchlässig gilt (Tabelle 6).

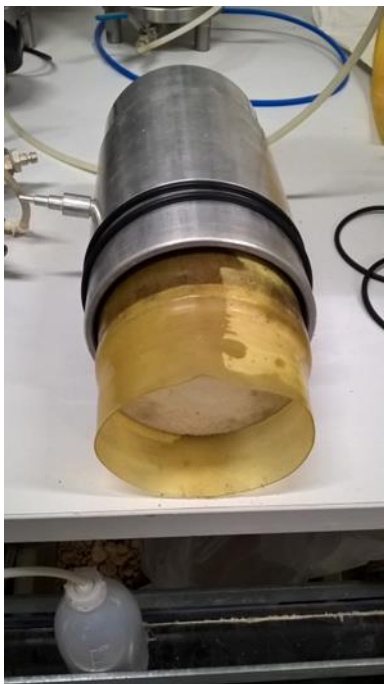


Abb. 34: Einbau des Probekörpers für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes



Abb. 35: Eingebauter Probekörper während der Messung

4.6 Quecksilberdruckporosimetrie

Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung wurde ein Quecksilberdruckporosimeter Pore-Master der Fa. Quantachrome verwendet. Der Messbereich im Low- und High-Pressure liegt bei diesem Gerät zwischen 950 und $3,6 \cdot 10^{-3}$ μm (Abb. 36).

In diesem Porengrößenbereich wurden vergleichende Messungen an verschiedenen Mischungen des Verfüllmörtels nach 28 Tagen Lagerung durchgeführt. Die bei der Hydratation des Mörtels entstandenen Poren sind mittels Quecksilberdruckporosimetrie messbar.

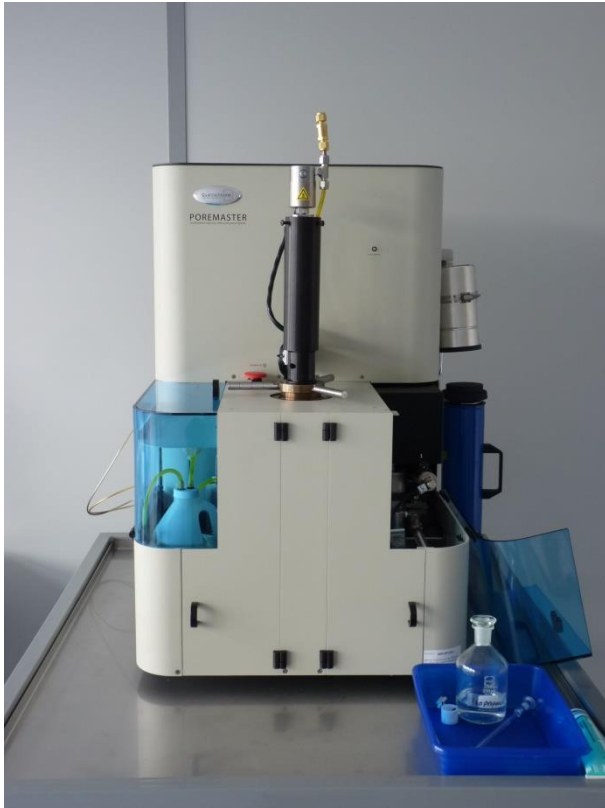


Abb. 36: Quecksilberdruckporosimeter PoreMaster der Fa. Quantachrome

Quecksilber ist aufgrund der hohen Oberflächenspannung und mit einem Kontaktwinkel, der zwischen 115° und 140° angenommen wird, eine nichtbenetzende Flüssigkeit. Entsprechend findet beim Kontakt von Quecksilber und Beton kein kapillares Saugen statt, beim Aufbringen eines äußeren Drucks wird das Quecksilber aber in den Porenraum gepresst. Die eingepresste Quecksilbermasse gibt Aufschluss über das Porenvolumen, während der hierfür erforderliche Druck Rückschlüsse auf den Porendurchmesser zulässt. Wird der aufgebraachte Druck schrittweise gesteigert, werden zunächst die größeren Poren und mit zunehmendem Druck die feineren Poren mit Quecksilber gefüllt. Unter der vereinfachten Annahme einer zylindrischen Porenform lässt sich mit Hilfe der Washburn-Gleichung die Porengröße über den Porenradius berechnen.

5 Mischungen/Rezepturen

Der Mischvorgang sollte in seinem Ablauf möglichst exakt wiederholt werden können, um mögliche Störeinflüsse auszuschließen und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten (Tabelle 7). Die Mischintensität, die durch Nutzung unterschiedlicher Ausgangsstoffe differieren kann, spielt ebenfalls eine große Rolle bei der Mischqualität. So variieren z.B.: Wasser-/Feststoffgehalt, die Korngrößenverteilung der Einzelstoffe und die spezifische Oberfläche der Stoffe, alles Eigenschaften die sich in unterschiedlichen Maße auf die Mischintensität auswirken.

Tabelle 7: Ablauf des Mischvorgangs

1.	Reinigen des Mixers mit Wasser, d.h. Mixer während des Betriebs füllen und spülen bis das Reinigungswasser klar ist, danach Wasser abtropfen lassen
2.	Abwiegen der Feststoffkomponenten, manuell vermischen mit Maurerkelle im Eimer
3.	Wasser abwiegen
4.	Einfüllen des Wassers in Mixer
5.	Einfüllen der Feststoffkomponenten
6.	Mixer mit Deckel abdecken und kurz mischen (5s), danach mit Maurerkelle homogenisieren
7.	Für 45s mischen und stoppen
8.	fertige Mischung begutachten und in großen Messbecher ablassen (Mixer dazu anstellen, bis alles ausgelaufen ist)

Im ersten Schritt der Rezeptentwicklung wurde der CEM III/B in unterschiedlichem Masseverhältnis mit Sand und Trass kombiniert (Tabelle 8). Als Sandersatz dienten in Einzelversuchen ein Basaltsand und ein Tuftsand. Die Verarbeitungseigenschaften konnten durch den Wasseranteil der Suspension gesteuert werden. Das Masse-Verhältnis zwischen Wasser und Feststoff wurde durch den w/f-Wert abgebildet.

Ein Referenzprodukt wurde einer Variation des w/f-Wertes unterzogen, um seinen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften zu quantifizieren. Ein eingestellter w/f-Wert von 0,3 lieferte optimale Ergebnisse in Hinblick auf die geforderte Trichterauslaufzeit.

Bei den eigenen Rezeptentwicklungen schwanken mit optimalen Marshtrichter-Auslaufzeiten (50 – 100 s) die w/f-Werte zwischen 0,3 und 0,8 abhängig von der Mischungsrezeptur.

Tabelle 8: Variationsbreite der Hauptkomponenten der verschiedenen Rezepturen

	Mischungszusammensetzung [M. %]		0 – Mischung
	Minimum	Maximum	
Sand	28,7	64,2	Ja
Zement	9,9	40,0	Nein
Vorwärmerkalk	6,3	17,2	Ja
Trass	5,0	28,6	Ja
Bentonit	2,9	13,1	Ja

6 Ergebnisse in Beziehung zur Wärmeleitfähigkeit

6.1 Dichte

Die Dichte eines porösen Festkörpers basiert auf dessen Masse und Volumen, einschließlich der ihm inhärenten Porenräume. Die Porosität ist für die Dichte eine maßgebliche Größe, gleichwohl sie selbst eine Messgröße ohne Dimensionen ist.

Die Wärmeleitfähigkeit hängt von verschiedenen Faktoren wie der Dichte, Porengrößen, Porengrößenverteilung, Wassergehalt und Temperatur ab. In der Regel wirkt sich eine steigende Rohdichte positiv auf die Wärmeleitfähigkeit und den Schallschutz von Baustoffen aus.

Wird die Wärmeleitfähigkeit wie in Abb. 37 und Abb. 38 unabhängig von der Zusammensetzung über die Frischrohddichte aufgetragen, zeigt sich bei den Versuchen kein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter oder trockener Proben und der Dichte.

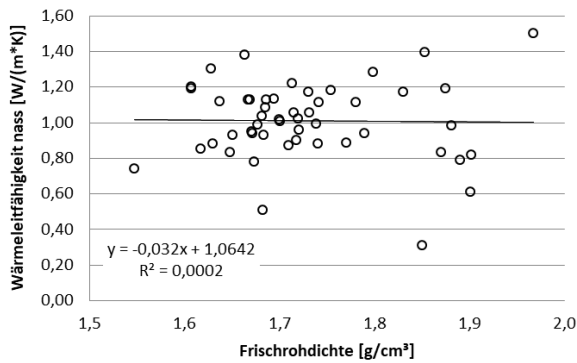


Abb. 37: Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit (nass) und Dichte

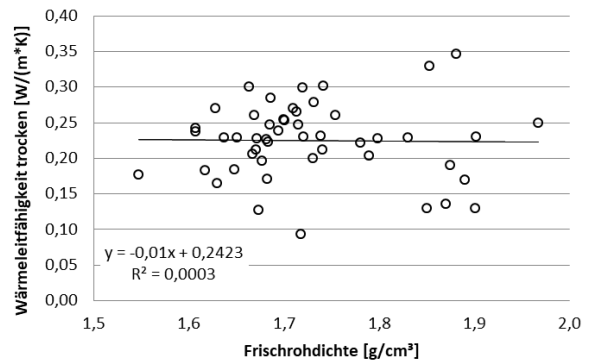


Abb. 38: Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit (trocken) und Dichte

6.2 Wärmeleitfähigkeitsadditive

Die in den Abb. 39 und Abb. 40 dargestellten Wärmeleitfähigkeiten stammen nur von Rezepturen die die vorgegebene Marshzeit von 50 – 100 s, eine Druckfestigkeit von > 1 N/mm² und ein Wasserabsetzmaß < 2 % nach 3 h bei 250 ml einhielten.

Alle in den nächsten Graphen dargestellten Wärmeleitfähigkeiten wurden mittels instationärer Messtechnik bestimmt. Von den hier dargestellten 36 Rezepturen erreichen nach 28 Tagen Lagerung im Normklima (20°C/65 % relative Luftfeuchte) nur 4 Mischungen eine Wärmeleitfähigkeit von 1 W/m*K (Abb. 39). Die 2 Referenzmörtel ohne Wärmeleitfähigkeitszusatz liegen unter 1 W/m*K, der wärmeleitfähigkeitsverbesserte Referenzmörtel erreicht bei einem w/f-Wert von 0,5 eine Wärmeleitfähigkeit von > 1 W/m*K.

Bei den wassergesättigten Mischungen erzielen 20 Rezepturen eine Wärmeleitfähigkeit von ≥ 1 W/m*K. Alle wassergesättigten Proben des wärmeleitfähigkeitsverbesserten Referenzmaterials zeigen Wärmeleitfähigkeiten von > 1 W/m*K, die anderen Referenzmaterialien liegen unter 1 W/m*K. 6 von 7 Rezepturen mit Graphen und 7 von 13 Rezepturen mit Korund leiten die Wärme mit > 1 W/m*K (Abb. 40).

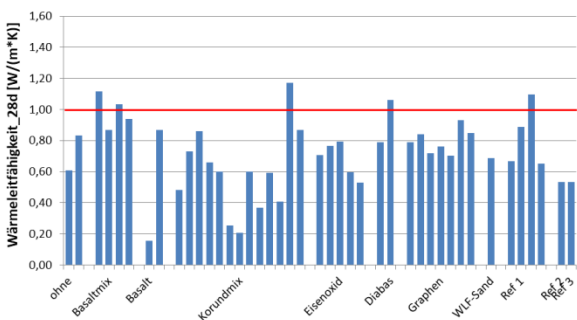


Abb. 39: Wärmeleitfähigkeit der 28 Tage alten Proben aus dem Normklima unterteilt nach eingesetzten Zusatzstoffen

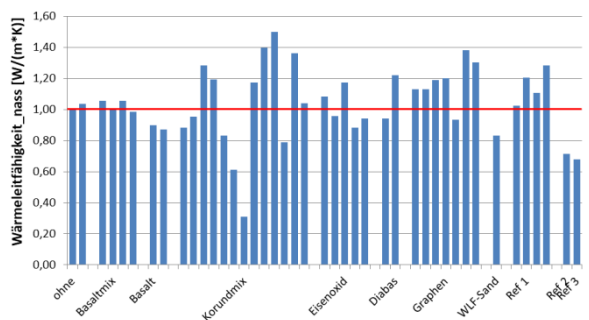


Abb. 40: Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt nach eingesetzten Zusatzstoffen

Trägt man die Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben gegen die Wärmeleitfähigkeit der Proben aus dem Normklima oder der getrockneten Probekörper auf findet man einen positiven Zusammenhang (Abb. 41 und Abb. 42). Dieser ist jedoch nicht signifikant.

Die Abb. 43 und Abb. 44 zeigen die Gesamtstichprobe als zusammengesetzte Stichprobe unterteilt in die verschiedenen Leitfähigkeitsadditive. Auch hier findet sich kein einheitliches Bild wie z.B. bei der Korrelation des Basaltes in Abb. 43 mit geringen Anstieg und hoher Korrelation, verglichen mit dem Korundmix mit höherem Anstieg und geringer Korrelation.

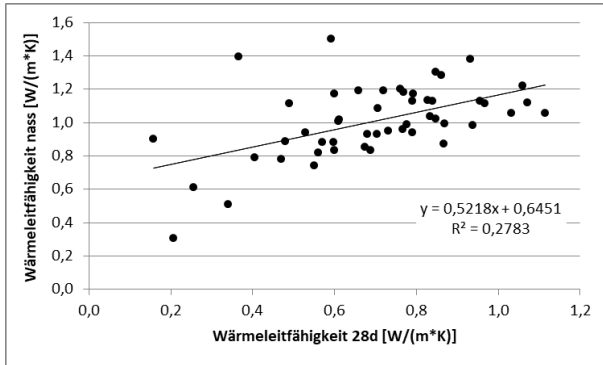


Abb. 41: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und 28 Tage alter Proben aus dem Normklima

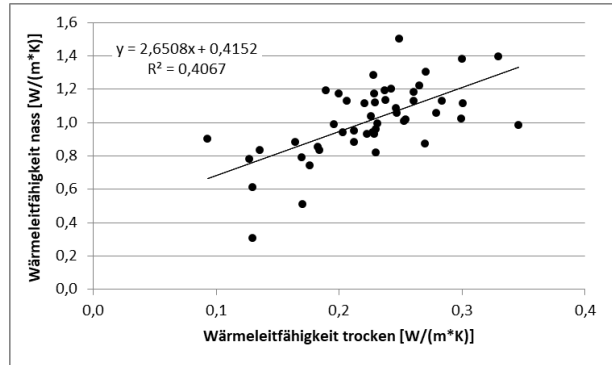


Abb. 42: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben

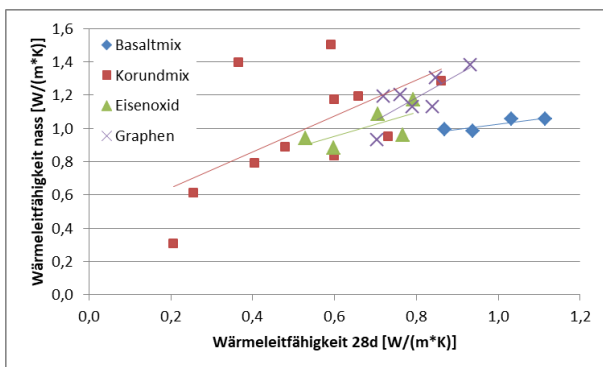


Abb. 43: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und 28 Tage alte Proben aus dem Normklima aufgeteilt nach Additiven

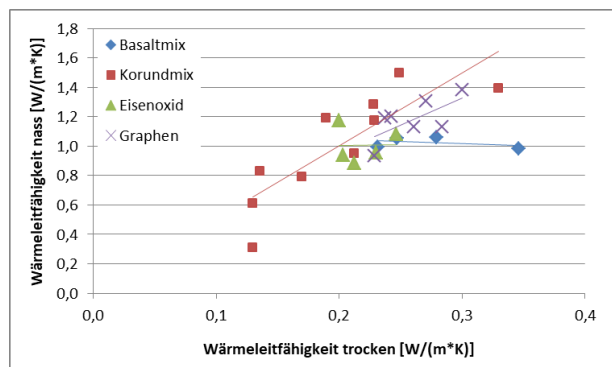


Abb. 44: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben aufgeteilt nach Additiven

Die Zugabemenge der Wärmeleitfähigkeitsadditive variiert je nach Verarbeitbarkeit der Mischungen. Vom sehr feinen Graphen lassen sich nur Mengen bis 4,2 M. % verarbeiten, während der Anteil an Korund zwischen 12 und 39 M. % liegt.

Durch die Zugabe von Leitfähigkeitsgraphen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit nach 28 d und im wassergesättigten Zustand steigern (Abb. 45 und Abb. 46). Eine noch höhere Zusatzmenge an Graphen ist jedoch aus verarbeitungstechnischen Gründen nicht möglich.

Die erhöhte Zugabe von Basalt, Korund und Eisenoxid wirkt sich nicht positiv auf eine gesteigerte Wärmeleitfähigkeit aus (Abb. 45 und Abb. 46).

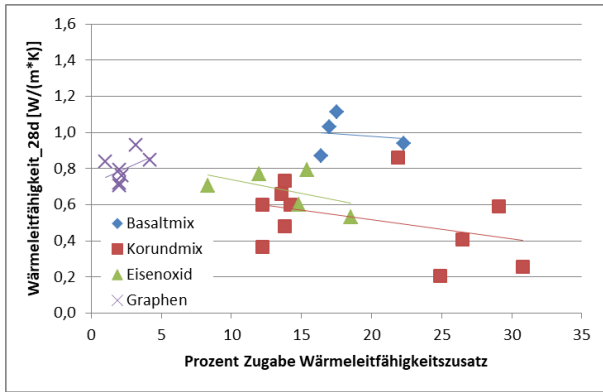


Abb. 45: Zusammenhang zwischen der Zugabe von verschiedenen Wärmeleitfähigkeitszusätzen und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen

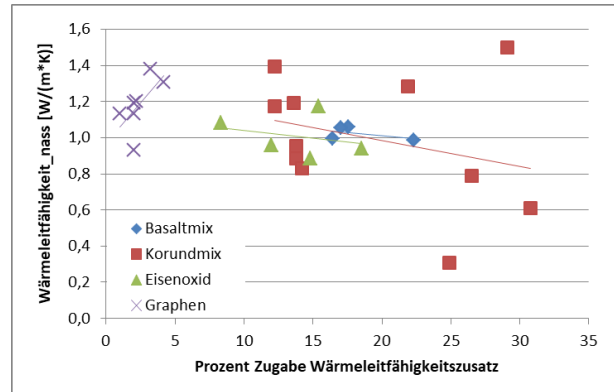


Abb. 46: Zusammenhang zwischen der Zugabe von verschiedenen Wärmeleitfähigkeitszusätzen und der ermittelten Wärmeleitfähigkeit im wassergesättigten Zustand

Allein die Zugabe von Wärmeleitfähigkeitsadditiven führt nicht zu einer gesteigerten Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmaterials, weder im wassergesättigten, trockenen oder Normklima-Zustand.

6.3 Wasserhaltevermögen

Als weiteres Optimierungspotential innerhalb des Projektes wurde ein verbessertes Wasseraufnahme- sowie Wasserhaltungsvermögen angesehen. Schon durch den Einsatz nur geringer Mengen an Cellulose, Stärke- und Celluloseether (0,3 – 1 M. %) konnten die Marshzeiten der VDI Richtlinie 4640 nicht eingehalten werden. Dieses Maß galt jedoch als Ausschlußkriterium für die weitere Versuchsdurchführung. Deshalb wurde sich im weiteren Projektverlauf auf Versuche mit Trass und Bentonit konzentriert.

Mit steigendem Trassgehalt (zwischen 5 und 29 M.%) kommt es zu einem höheren Wassergehalt der wassergesättigten Proben (Abb. 47), jedoch ist keine eindeutige Korrelation erkennbar. Beim Bentonit ist es ähnlich, auch hier kommt es mit steigendem Bentonitgehalt zu einem höheren Wassergehalt der wassergesättigten Proben (Abb. 48), trotzdem ist auch hier keine direkte Abhängigkeit erkennbar.

Die Graphen (Abb. 49 und Abb. 50) lassen eine Clusterbildung erkennen, die Wärmeleitfähigkeitsadditive liefern indes nicht die Erklärung für diese Muster.

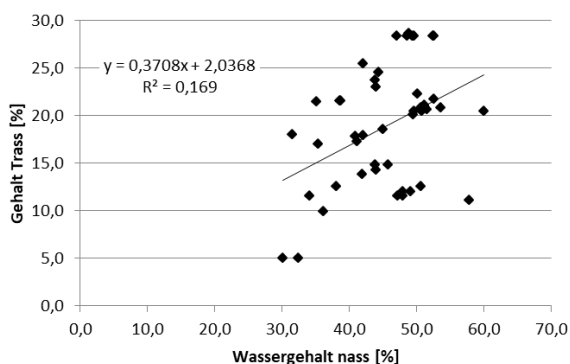


Abb. 47: Zusammenhang zwischen der zugegebenen Trassmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben

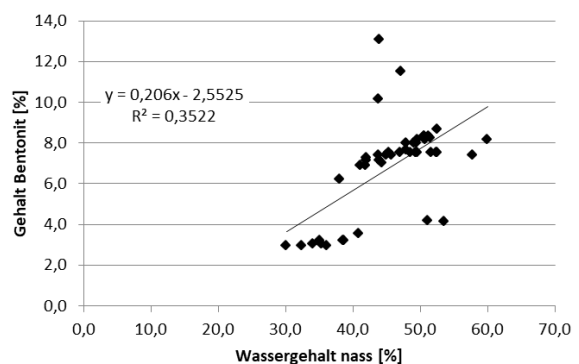


Abb. 48: Zusammenhang zwischen der zugegebenen Bentonitmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben

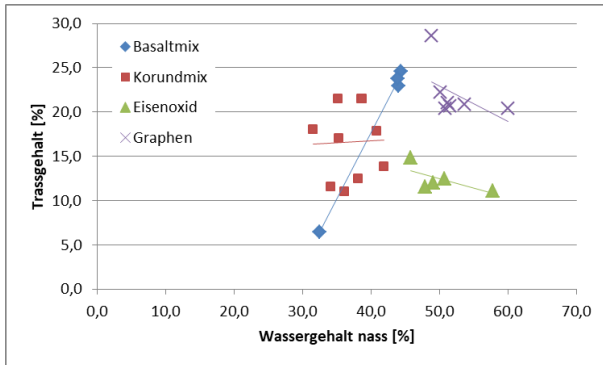


Abb. 49: Zusammenhang zwischen der zugegebenen Trassmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben, unterteilt nach verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditiven

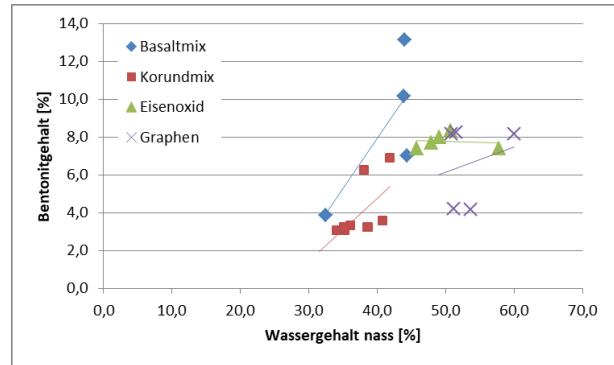


Abb. 50: Zusammenhang zwischen der zugegebenen Bentonitmenge und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben, unterteilt nach verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditiven

Korreliert man die Wärmeleitfähigkeit mit dem Trass- oder Bentonitgehalt zeigen die Abb. 51 und Abb. 52 keine positiven Effekte. Dies trifft auch auf die trockenen und Normklima-Proben zu.

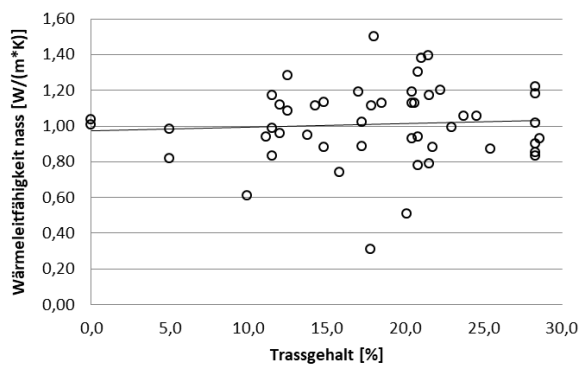


Abb. 51: Zusammenhang zwischen Trassgehalt und Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben

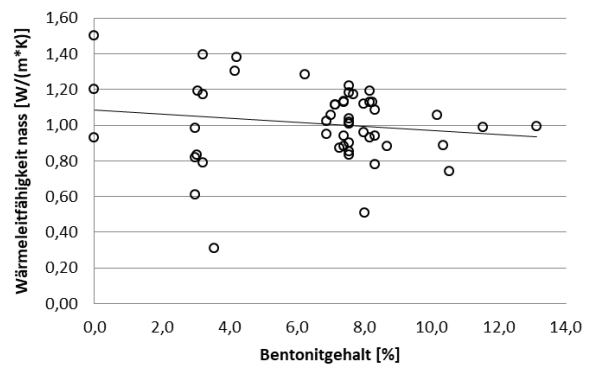


Abb. 52: Zusammenhang zwischen Bentonitgehalt und Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben

6.4 Wassergehalt

Für die verschiedenen Rezepturen des Verfüllmörtels lässt sich keine Abhängigkeit zwischen Feuchtegehalt der wassergesättigten Proben und der Wärmeleitfähigkeit finden (Abb. 53). Ist der Wassergehalt der Proben nach 28 Tagen Lagerung im Normklima höher, so zeigen die Proben tendenziell auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit (Abb. 54).

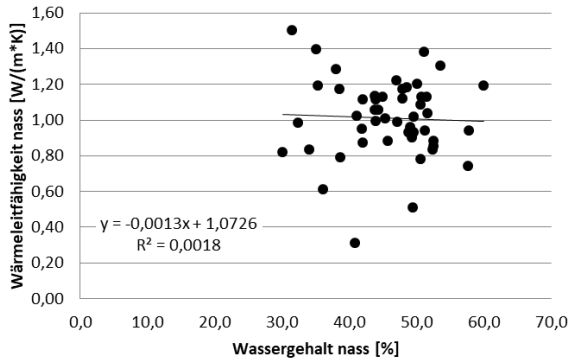


Abb. 53: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Endfeuchte der wassergesättigten Proben

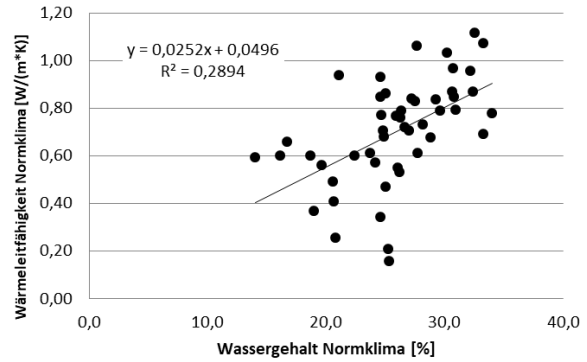


Abb. 54: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Feuchte der Proben nach 28 Tagen Lagerung im Normklima

Für alle Proben die mit dem instationären Wärmeleitfähigkeitsmessgerät beprobt wurden, liegen 4 Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (zwischen 0 % Feuchte und Wassersättigung) vor.

Bei allen einzelnen Mischungen versetzt mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditiven lässt sich eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit mit erhöhtem Wassergehalt erkennen (Abb. 55 - Abb. 58).

Die Mischung mit Korund zeigt auch im wassergesättigten Zustand den geringsten Wassergehalt (um die 40 M. %; Abb. 57), während bei Graphen und Eisenoxid der Wassergehalt im wassergesättigten Zustand >50 M. % misst (Abb. 56 und Abb. 58).

Die Korundrezepturen zeigen die größten Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit bei ähnlichem Wassergehalt (Abb. 57), während bei Graphen nur geringe Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit bei ähnlichem Wassergehalt zu finden sind (Abb. 58).

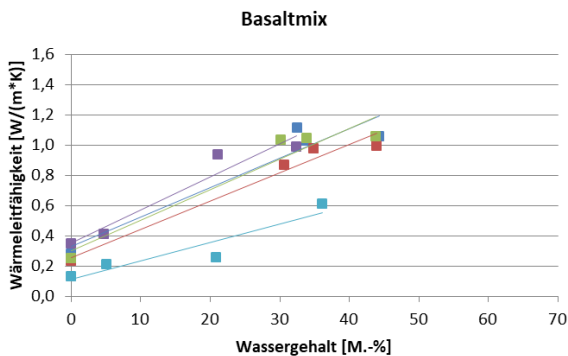


Abb. 55: Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Basalt

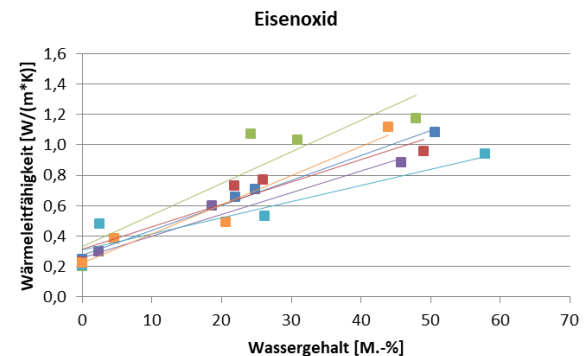


Abb. 56: Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Eisenoxid

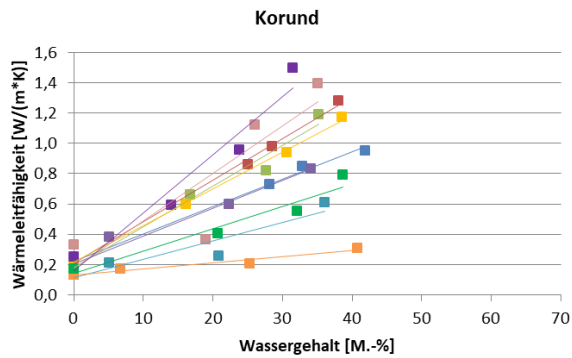


Abb. 57: Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Korund

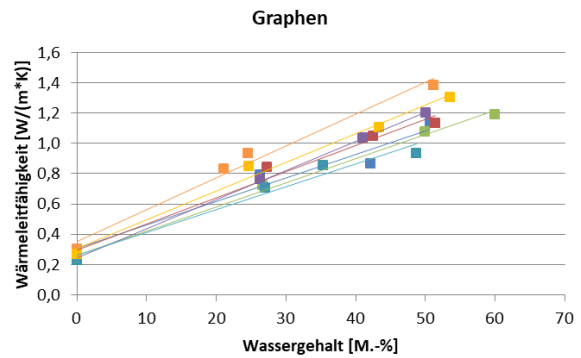


Abb. 58: Gemessene Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes verschiedener Mörtelrezepturen mit Graphen

Die Abb. 59 und Abb. 60 stellen die Wärmeleitfähigkeit bei entsprechendem Wassergehalt für verschiedene Anteile an Korund und Graphen dar. Eine höhere Menge an Korund und Graphen führt bei allen 4 Feuchtegehalten nicht automatisch zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit (Abb. 59 und Abb. 60). Unabhängig vom Gehalt der Wärmeleitfähigkeitsadditive unterscheiden sich die Wärmeleitfähigkeiten im trockenen Zustand nur gering.

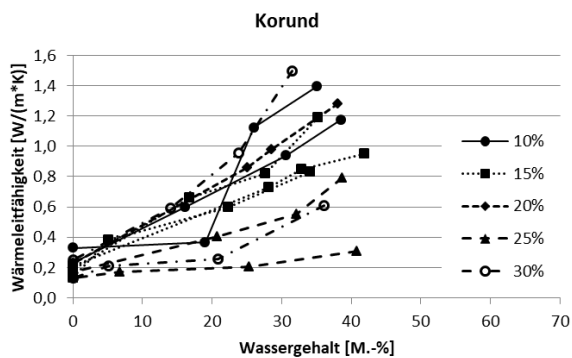


Abb. 59: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt mit unterschiedlichen Korundanteilen in der Rezeptur

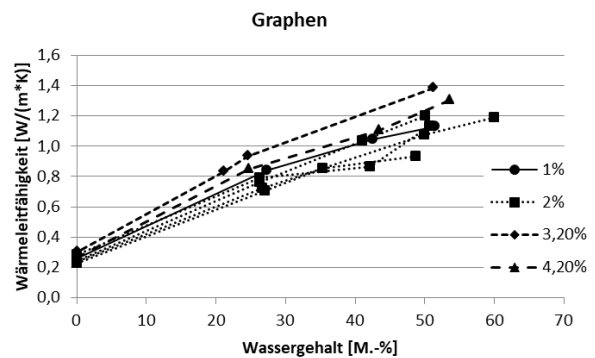


Abb. 60: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt mit unterschiedlichen Graphenanteilen in der Rezeptur

6.5 Stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung

Mit dem stationären Verfahren der Wärmeleitfähigkeitsmessung wurde nur ein geringer Anteil an Proben gemessen. Die Messung erfolgte an insgesamt nur 9 Mischungen im wassergesättigten und trockenen Zustand.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit im 2-Plattenverfahren ist im Gegensatz zum Sondenverfahren sehr aufwendig, eine Messung kann mehrere Stunden bis Tage dauern.

Auch beim Plattenverfahren gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der wassergesättigten und der trockenen Proben (Abb. 61).

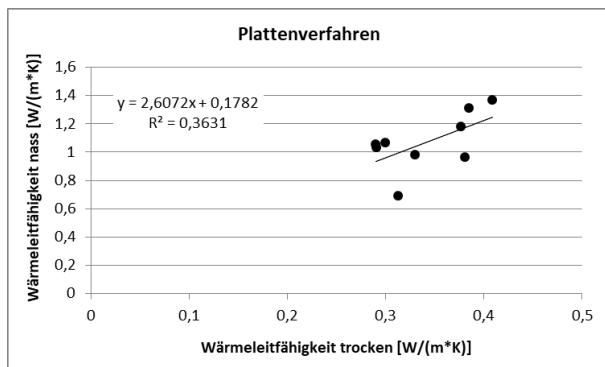


Abb. 61: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter und trockener Wärmeleitfähigkeitsproben gemessen mit dem Plattenverfahren

6.6 Vergleich instationäre und stationäre Wärmeleitfähigkeitsmessung

Stationäre Methoden zeichnen sich durch einfache Messapparate aus, die präzise und zuverlässige Ergebnisse erzielen. Wegen des eindimensionalen Wärmestroms wird die Orientierung der thermischen Anisotropie erfasst, hingegen ist bei instationären Verfahren nur die Bestimmung von Mittelwerten der richtungs-abhängigen Wärmeleitfähigkeit möglich. Von Nachteil sind die lange Messdauer und eine aufwendige Probenvorbereitung bei der stationären Messung.

Instationäre Methoden haben im Vergleich zu stationären viel kürzere Messzeiten, wodurch der Einfluss der Konvektion verhindert werden kann. Außerdem lässt sich neben der Wärmeleitfähigkeit auch die Temperaturleitfähigkeit bestimmen. Schwierig sind die Umsetzung der Randbedingungen und die verwendeten mathematischen Modelle, die auf der Fourier'schen Differentialgleichung basieren.

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse beider Verfahren im nassen und trockenen Zustand aufgelistet.

Tabelle 9: Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten und trockenen Proben im Vergleich von Platten- und Sondenverfahren

	Wärmeleitfähigkeit nass [W/(m*K)]		Wärmeleitfähigkeit trocken [W/(m*K)]	
	Plattenverfahren	Sondenverfahren	Plattenverfahren	Sondenverfahren
M32	1,029	1,22	0,291	0,27
M35	1,055	1,19	0,290	0,24
M47	0,977	1,11	0,330	0,30
M57	0,960	0,97	0,381	0,25
M64	1,178	1,04	0,377	0,23
M67	0,691	1,19	0,313	0,19
M69	1,307	1,30	0,385	0,27
M71	1,365	1,17	0,409	0,23
M72	1,062	0,61	0,300	0,13

Aus den Abb. 62 und Abb. 63 ist kein Zusammenhang zwischen dem Sonden- und Plattenverfahren im nassen und trockenen Zustand ersichtlich.

Bei trockenen Probekörpern misst das Sondenverfahren immer, wenn auch teilweise nur geringfügig, niedrigere Wärmeleitfähigkeiten als das Plattenverfahren, ein linearer Zusammenhang ist nicht erkennbar (Abb. 63). Die Ergebnisse der wassergesättigten Proben sind verschieden (Abb. 62). In 4 der 9 Messungen sind die Ergebnisse des Sondenverfahrens höher, in 3 Fällen misst das Plattenverfahren höhere Werte und bei den Mischungen M57 und M69 zeigen beide Messverfahren fast identische Werte (Tabelle 9).

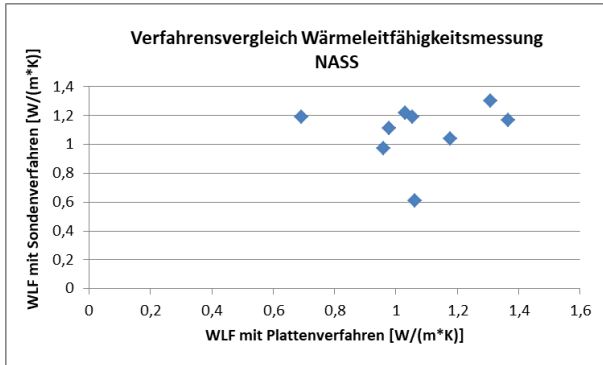


Abb. 62: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von wassergesättigten Proben ermittelt mit 2 unterschiedlichen Messverfahren

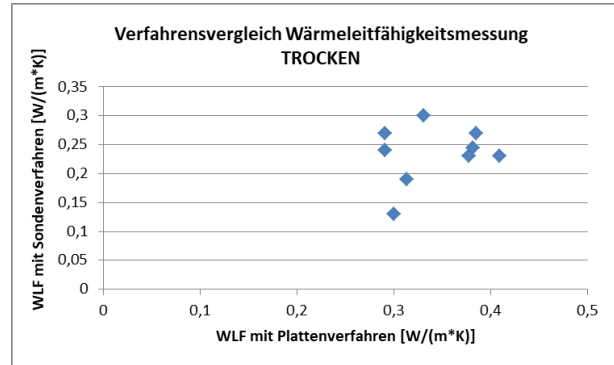


Abb. 63: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von trockenen Proben ermittelt mit 2 unterschiedlichen Messverfahren

7 Packungsdichte

Betone und Mörtel mit hoher Packungsdichte zeichnen sich durch eine gute Fließfähigkeit, hohe Frischbetonstabilität sowie gute Festbetoneigenschaften aus [6].

Die Packungsdichte von Beton beschreibt das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen und ist eine Kenngröße für die Betongüte.

Die Packungsdichte bzw. der Hohlraumgehalt des Feinstoffgemisches wird von der Kornverteilung aller Feinstoffpartikel und der Verdichtung bestimmt. Der Hohlraumgehalt kann insbesondere durch die Mischung von Feinstoffen deutlich unterschiedlicher Kornverteilung und Korngröße verringert werden.

Werden Hohlräume zwischen den Feststoffen mit feineren Partikeln gefüllt, steigt die Packungsdichte der Mischung. Wird Wasser zugegeben, werden zunächst die verbleibenden Hohlräume gefüllt, bevor sich das überschüssige Wasser als Gleitfilm auf die Oberfläche der Partikel legt. Auch wenn Oberflächen, die mit dem Wasser in Kontakt kommen, benetzt werden bevor alle Hohlräume gefüllt sind, sinkt der Wasseranspruch der Mischung mit sinkendem Hohlraumgehalt. Dies geht auch aus einem Vergleich der rechnerischen Porosität mit dem experimentell bestimmten Wasserbedarf hervor [7]. In der Folge wird der Frischbeton fließfähig, bleibt aufgrund der geringeren Wassermenge jedoch gleichzeitig stabil.

Die erreichbare Packungsdichte eines Betons wird von der Partikelform, der Partikelgrößenverteilung und dem Energieeintrag während des Mischvorgangs, des Einbaus und Verdichtens beeinflusst. Dabei erhöhen runde Partikel die Packungsdichte, der Einfluss der Kornform besteht in allen Korngrößenbereichen, so auch im Mehlkornbereich [6]. Was die anderen beiden Einflussgrößen betrifft, wirkt sich eine weitgestufte Partikelgrößenverteilung ebenso wie ein hoher Energieeintrag positiv auf Packungsdichte und Betoneigenschaften aus.

Resultierend aus der Theorie lässt sich festhalten, dass eine höhere Packungsdichte einen hohen Feststoffanteil /hohe Rohdichte und eine niedrige Porosität bedingt, welches mögliche Wärmetransportprozesse abmindert. Zusätzlich sollte sich die Porengröße auf 10 nm beschränken um dauerhaft eine hohe Wassersättigung innerhalb der verbleibenden Gelporenräume zu etablieren und einen möglichen Gastransport zu minimieren [8].

7.1 Annäherung an eine optimale Kornverteilungskurve

Es stehen verschiedene Methoden der theoretischen Packungsdichteoptimierung eines Korngemisches zur Verfügung.

Die Methode zur Annäherung an eine Kornverteilungskurve beschreibt die Anpassung der Sieblinie eines Gemisches an formalisierte Kornverteilungskurven, die in Form von Regelsieblinien verankert sind [9].

Den Einfluss einer hohen Packungsdichte auf die Eigenschaften von Beton wurde schon von Fuller und Thomson im Jahre 1907 erkannt. Aus deren experimentellen Untersuchungen stammt die so genannte „Fuller-Kurve“, eine quadratische Parabel, die für einen stetigen Verlauf der Korngrößenverteilung für runde Körner (Kugeln), einem begrenzten Mehlkornanteil und den in der Betontechnologie eingesetzten Methoden der Verdichtung die optimale Packungsdichte ergibt.

Die experimentell ermittelte Fuller-Kurve stellt im Grunde einen Spezialfall der von Dinger - Funk gefundenen Gleichung dar, die im Bereich der Keramik für die Bestimmung der optimalen Packungsdichte eingesetzt wird (Abb. 64).

Experimentell wurde gezeigt, dass diese Gleichung eine optimale Packungsdichte für Keramik bei einem Verteilungsmodul von $q = 0,37$ (bei Fuller ist es das Verteilungsmodul n) ergibt.

Für das Verteilungsmodul q gibt es in der Literatur und aufgrund verschiedener Versuchsreihen und Simulationen unterschiedliche Angaben zur Wahl dieses Exponenten. Dieser Exponent q kann zwischen 0,2 und 0,37 liegen [10]. Das Verteilungsmodul q ist für grobe Körner, umgeben von unregelmäßig geformten kleineren Körnern, kleiner als 0,37 zu wählen. Über das Verteilungsmodul und den Exponenten q kann der Anteil der Feinstoffe berücksichtigt werden. Nimmt q höhere Werte an, wie z. B. 0,4 bis 0,7, so führt dies zu einer grobkörnigen Mischung. Kleinere Werte von q bedeuten, dass der Anteil an Feinstoffen in der Mischung sehr hoch ist [10].

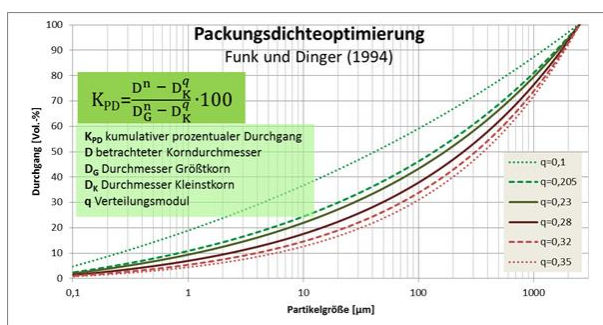


Abb. 64: Theoretische Packungsdichteoptimierungsberechnung nach Funk und Dinger mit zugehöriger Partikelgrößenverteilung verschiedener Verteilungsmoduli

Die Sieblinien der Musterrezepturen wurden teilweise mit dem Packungsdichteoptimierungsmodell von Funk und Dinger (Abb. 65 bis Abb. 67) erstellt oder die Fehlerquadrate wurden im Nachhinein anhand der Mischungsrezeptur berechnet. Dies soll eine je nach Verteilung der Kornklassen optimale theoretische Zusammensetzung der Sieblinie mit wenigen Hohlräumen ermöglichen, welche durch eine Bindemittelmatrix gefüllt sind. Da es sich bei den Verfüllmörtelrezepturen um Mischungen mit hohem Feinstoffanteil ohne gröbere Körnung handeln, erfolgen alle Berechnungen nach einem Verteilungsmodul von $q = 0,22$.

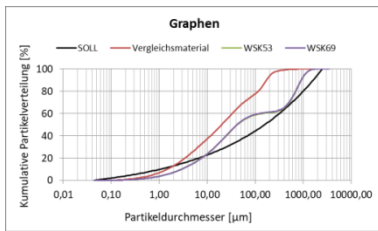


Abb. 65: Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie beispielhafter Graphenmischungen

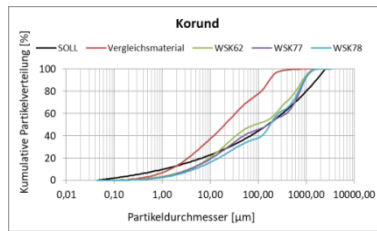


Abb. 66: Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie beispielhafter Korundmischungen

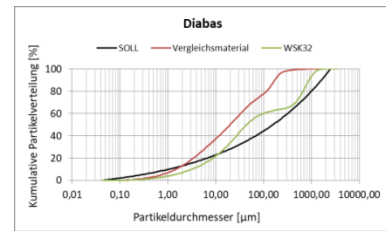


Abb. 67: Rechnerische Soll-Zusammensetzung der Korngemische mit abweichender Zusammensetzung der Referenz- sowie Diabasmischung

Die Mengenanteile für die einzelnen Feststoffkomponenten der Mörtelrezeptur wurden festgelegt, indem die Abweichungen der zu optimierenden Kornverteilung von der Optimalverteilung minimiert wurden. Dabei handelte es sich um die sogenannte Fehlerquadratanpassung oder auch um die Methode der kleinsten Quadrate. Darunter ist die Summe der quadrierten Abweichungen, die minimiert wird, zu verstehen. Diese Abweichungen werden Residuen oder Fehler genannt. Die Kornverteilungen der einzelnen Fraktionen liegen in Form diskreter akkumulativer Messwerte vor. Da die Kornverteilung in Vol. % ausgegeben wird, muss für die Berechnung der Mengenanteile mit Hilfe der Rohdichten der einzelnen Feststoffe umgerechnet werden.

Für das Optimierungsproblem müssen Randbedingungen eingeführt werden, damit die Variablen realistische Werte annehmen und die Einschränkungen verschiedener Regeln oder Richtlinien zur Herstellung des Mörtels eingehalten werden.

Folgende Randbedingungen wurden eingehalten:

- die Summe aller Feststoffe muss 100 % ergeben
- minimaler und maximaler Zementgehalt
- maximaler Bentonitgehalt

Es wurden nur Rezeptvorschläge im Bericht berücksichtigt, die die Vorgaben der Marshzeit, Suspensionsstabilität und die Druckfestigkeit aus der Richtlinie VDI-4640 erfüllen.

Die Abb. 68 zeigt die Mischungen mit der geringsten Abweichung der Fehlerquadrate nach der Soll-Sieblinie von Funk und Dinger. Die größte Abweichung tritt dabei bei den sehr feinen Partikeln $< 10 \mu\text{m}$ auf und im Bereich $> 1000 \mu\text{m}$ auf.

Die Referenzmischung mit Wärmeleitfähigkeitszusätzen weicht stark von der Soll-Sieblinie ab (Abb. 69). Rezepturen bei denen im Nachhinein eine Fehlerquadratberechnung durchgeführt wurde ähneln in ihrem Verlauf und in der Summe der Fehlerquadrate der Sieblinie der Referenzmischung und nicht der Soll-Sieblinie.

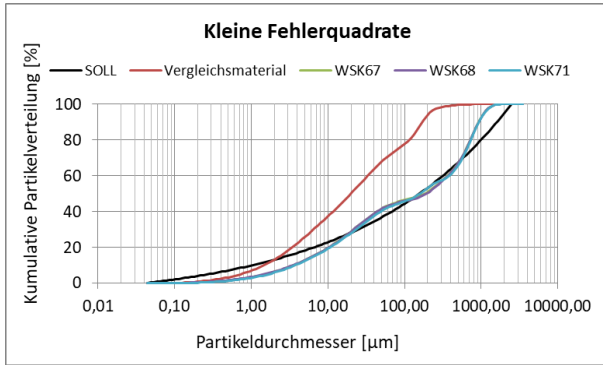


Abb. 68: Beispiele von Musterrezepturen mit kleinen Fehlerquadrate

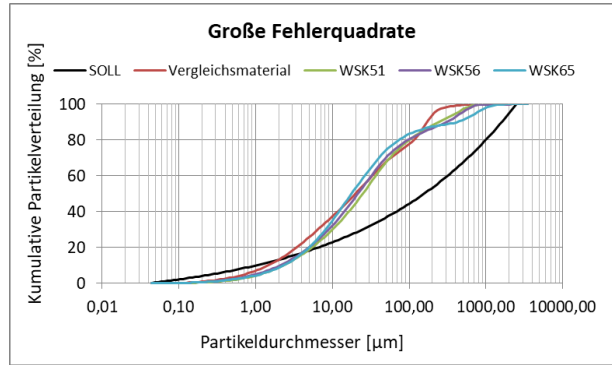


Abb. 69: Beispiele von Musterrezepturen mit großen Fehlerquadrate

Die Ergebnisse einzelner Mischungen mit errechneten Fehlerquadrate und dazugehörige Wärmeleitfähigkeiten und Wassergehalte sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Mischungen mit guten Wärmeleitfähigkeiten, hohen und geringen Fehlerquadrate und dazugehörige Wassergehalte

Einteilung	Mischung	ΣFehlerquadrate	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]		Wassergehalt [M%]	
			28d	nass	28d	nass
Referenz w/f-Wert 0,3	mit WLF-zusatz	49.500	0,67	1,02	8,2	21,7
Leitfähigkeitsgraphen	M53	7.130	0,99	1,38	24,6	51,2
	M69	7.520	0,85	1,30	24,6	53,6
Korund	M62	4.890	0,86	1,28	25,1	38,1
	M77	3.080	0,37	1,40	19,0	35,1
	M78	4.340	0,59	1,50	14,0	31,5
	M81	5.130	1,17	1,36	20,8	28,8
Diabas	M32	7.780	1,06	1,22	27,7	47,1
geringe ΣFQ	M67	3.100	0,66	1,19	25,1	38,1
	M68	3.030	0,60	0,83	22,4	34,1
	M71	3.080	0,60	1,17	16,1	38,5
hohe ΣFQ	M51	42.020	0,67	0,85	28,8	52,6
	M56	43.500	0,87	0,87	32,4	42,1
	M65	48.110	0,69	0,83	33,3	52,4

Die folgenden Abbildungen Abb. 70 und Abb. 71 zeigen, dass kein Zusammenhang zwischen der Summe der kleinsten Fehlerquadrate und der Wärmeleitfähigkeit im wassergesättigten und trockenen Zustand bei den getesteten Rezepturen vorliegt.

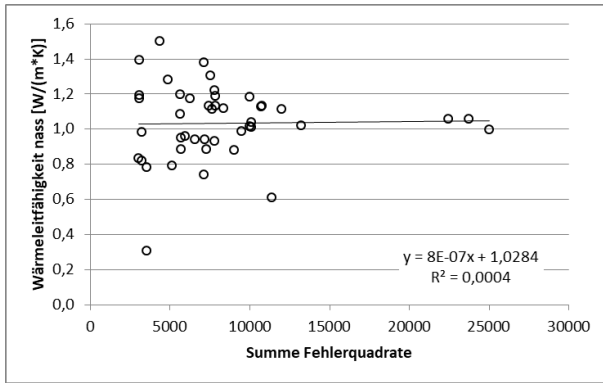


Abb. 70: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate

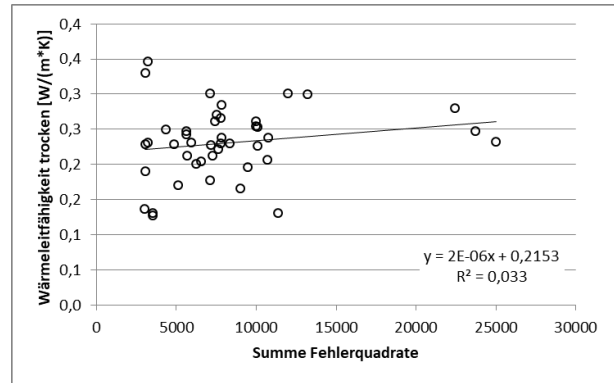


Abb. 71: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der getrockneten Proben in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate

Unterteilt man die Gesamtstichprobe in die verschiedenen Wärmeleitfähigkeitsadditive, lässt sich auch da kein Muster oder eine Abhängigkeit erkennen (Abb. 72 und Abb. 73).

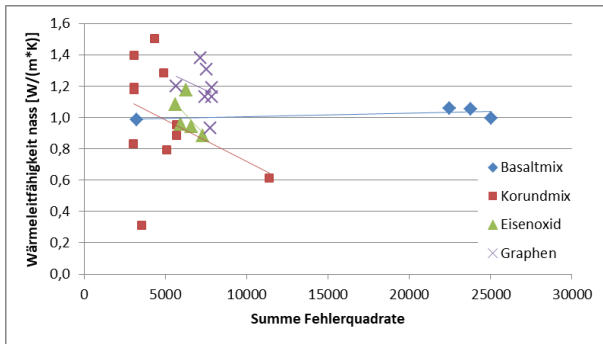


Abb. 72: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt in verschiedene Wärmeleitfähigkeitsadditive in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate

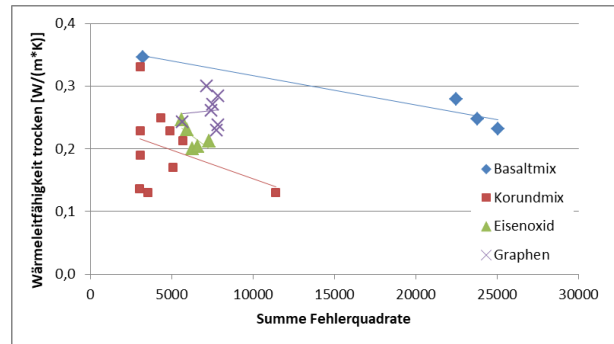


Abb. 73: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben unterteilt in verschiedene Wärmeleitfähigkeitsadditive in Abhängigkeit der berechneten Summe der kleinsten Fehlerquadrate

8 Porenverteilung/Porengefüge

Beton/Mörtel enthält Poren mit Durchmessern von wenigen Nanometern bis hin zu einigen Millimetern. Die Porengrößen und der Porenanteil im Zementstein werden maßgeblich vom w/f-Wert, aber auch von der Bindemittelzusammensetzung beeinflusst. Während Beton mit zunehmendem Wassergehalt eine höhere Porosität aufweist, führt die Verwendung von Zusatzstoffen zu einem dichteren Gefüge und damit in der Regel auch zu kleineren Poren. Die Umgebungsbedingungen während der Hydratation stellen einen weiteren Einflussfaktor auf die Porengrößenverteilung dar. Niedrige Temperaturen bewirken einen höheren Anteil an chemisch gebundenem Wasser, der zur Ausbildung dichter CSH-Phasen und einer geringeren Porosität führt.

Sowohl die Porosität als auch die Porengrößenverteilung von Beton und Mörtel lassen sich im Bereich der Gel- und Kapillarporen mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmen, während in der Größenordnung der Luftporen Aufnahmen mit einem Lichtmikroskop geeignet sind, um die Porosität zu ermitteln. Die Poren im Beton/Mörtel werden entweder nach der Porengröße oder nach der Entstehungsart unterschieden. Die in Tabelle 11 dargestellte Einteilung nach der Größe in Mikro-, Meso- und Makroporen bezieht sich auf Poren,

die während der Zementhydratation zwischen den Reaktionsprodukten entstehen und ist bei der Ermittlung von Sorptionsisothermen gängig, da die aufgenommenen Wassermoleküle zunächst die Mikroporen füllen. Wird die Porenart betrachtet, sind Gelporen ($<10^{-7} \mu\text{m}$) die kleinsten Poren, die in der Regel mit Porenlösung gefüllt sind. Nach [Busch und Luckner ist die hydraulische Leitfähigkeit durch Poren, die kleiner als 3 – 8 μm sind, begrenzt. Deshalb wurden in den folgenden Berechnungen und Abbildungen die Poren $<3 \mu\text{m}$ als hydraulisch nicht wirksam und nur Poren $>8 \mu\text{m}$ als hydraulisch wirksam eingeschätzt.

Tabelle 11: Einteilung der Poren nach Größe

	Durchmesser [nm]
Mikroporen	< 2
Mesoporen	2 . . . 50
Makroporen	> 50

Der Hauptanteil des mit der Quecksilberporosimetrie gemessenen Porenvolumens bilden Poren $< 3 \mu\text{m}$. Der Anteil dieser Porengröße liegt bei allen Probekörpern über 90 %. Der Anteil der Poren zwischen 8 und 150 μm schwankt in einem geringen Rahmen zwischen 3,9 % und 7,3 % (Abb. 74).

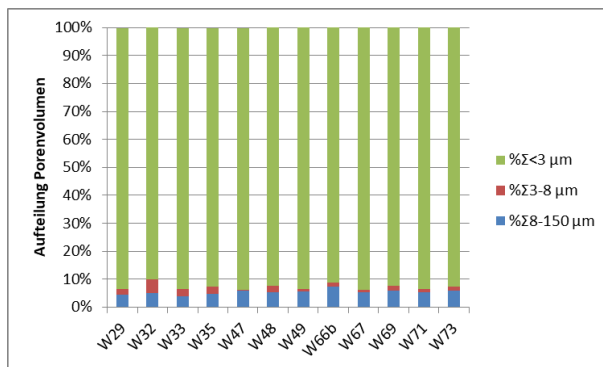


Abb. 74: Anteil Porenöffnungsvolumen unterteilt in 3 verschiedene Porengrößenklassen

Exemplarisch sind einzelne Proben der Quecksilberporosimetrie in den Abb. 75, Abb. 76, Abb. 79 und Abb. 80 dargestellt.

Mischung 32 zeigt von allen gemessenen Proben das höchste Gesamtporenvolumen mit $0,58 \text{ cm}^3$ Quecksilber pro Gramm Probenmaterial, dies gilt für den Anteil der Poren mit dem Radius $< 3 \mu\text{m}$ und im Porenvolumenbereich zwischen 8 - 150 μm (Abb. 75). Vergleicht man den prozentuellen Anteil der Porengrößenverteilung ist das die Mischung mit dem geringsten Anteil an Poren $< 3 \mu\text{m}$ (90 %). Das Material weist eine gute Wärmeleitfähigkeit nach 28 Tagen im Normklima ($1,06 \text{ W/m}^*\text{K}$) und im nassen Zustand ($1,22 \text{ W/m}^*\text{K}$) auf.

Die geringste gemessene Wärmeleitfähigkeit aller Quecksilberporosimetrieproben wurde an der Mischung 73 gemessen (Normklima $0,21 \text{ W/m}^*\text{K}$, nass $0,31 \text{ W/m}^*\text{K}$). Insgesamt zeigt die Probe ein geringes Gesamtporenvolumen mit $0,357 \text{ cm}^3$ Quecksilber pro Gramm Probenmaterial mit einem geringen Porenvolumenanteil $< 3 \mu\text{m}$ (Abb. 76).

Die Messungen der Quecksilberporosimetrie werden anhand der REM-Aufnahmen beider Proben gedeckt (Abb. 77 und Abb. 78). Die Abb. 78 zeigt ein dichteres Gefüge verglichen mit Abb. 77.

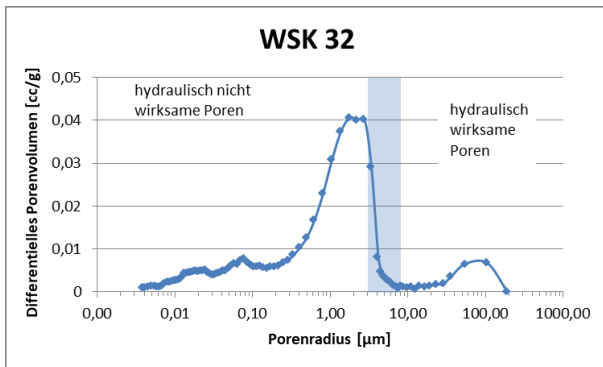


Abb. 75: Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 32

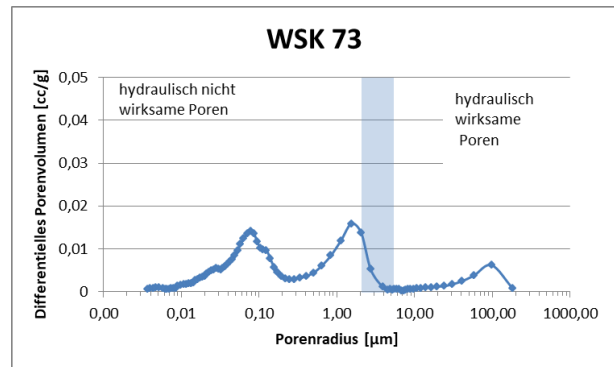


Abb. 76: Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 73

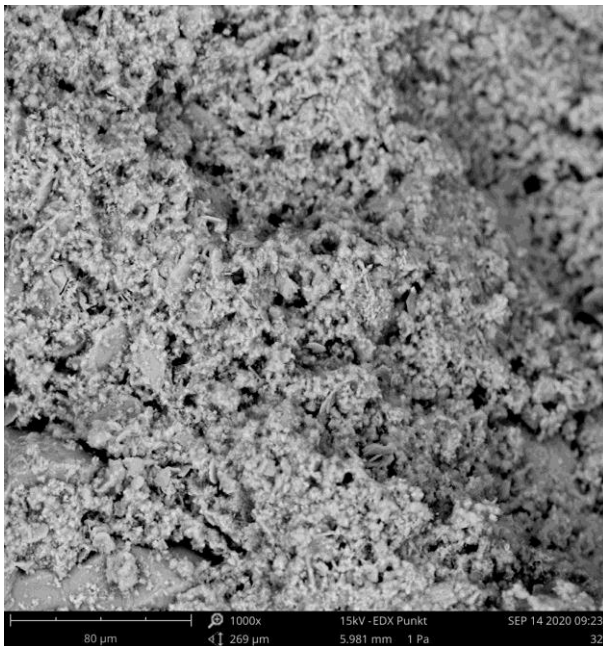


Abb. 77: REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 32

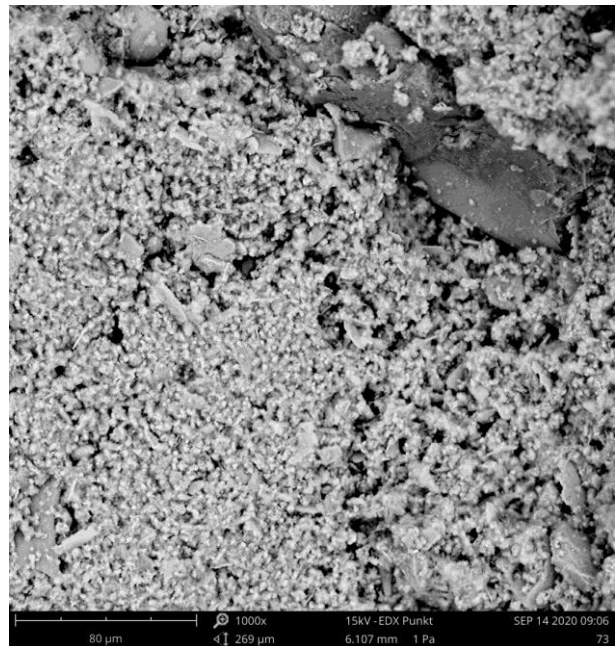


Abb. 78: REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 73

Mischung 67 und 69 zeigen ähnliche Wärmeleitfähigkeiten im nassen Zustand und nach 28 Tagen Lagerung im Normklima. Das Porenvolumen unterscheidet sich jedoch. Probe 67 hat ein geringes Gesamtporenvolumen (0,324 cm³/g) und somit auch geringe Porenvolumen im Bereich < 3 μm und zwischen 8 – 150 μm (Abb. 79). Probe 69 weist ein höheres Gesamtporenvolumen (0,502 cc/g) und somit auch höheres Porenvolumen im Bereich < 3 μm und zwischen 8 – 150 μm auf (Abb. 80). Die Verhältnisse im Bereich < 3 μm und 8 – 150 μm unterscheiden sich jedoch nur gering (93,9 % und 92,3 % sowie 5,4 % und 5,9 % bei 8 – 150 μm). Die Abbildungen Abb. 81 und Abb. 82 vermitteln einen Eindruck der Proben durch die REM-Aufnahmen.

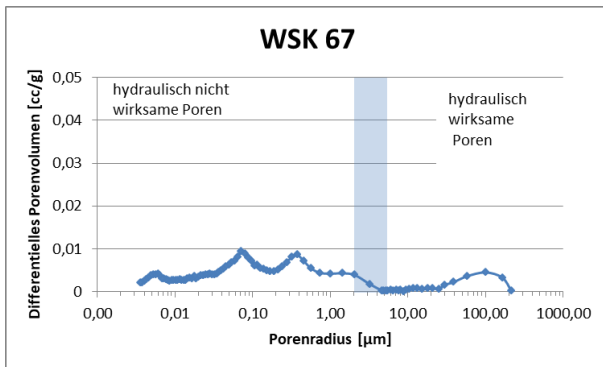


Abb. 79: Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 67

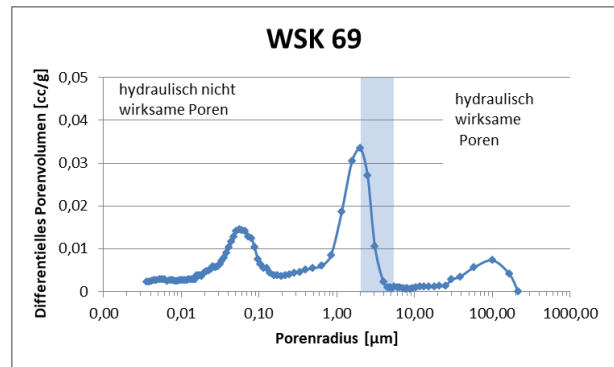


Abb. 80: Porenöffnungsverteilung der Mörtelmischung 69



Abb. 81: REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 67

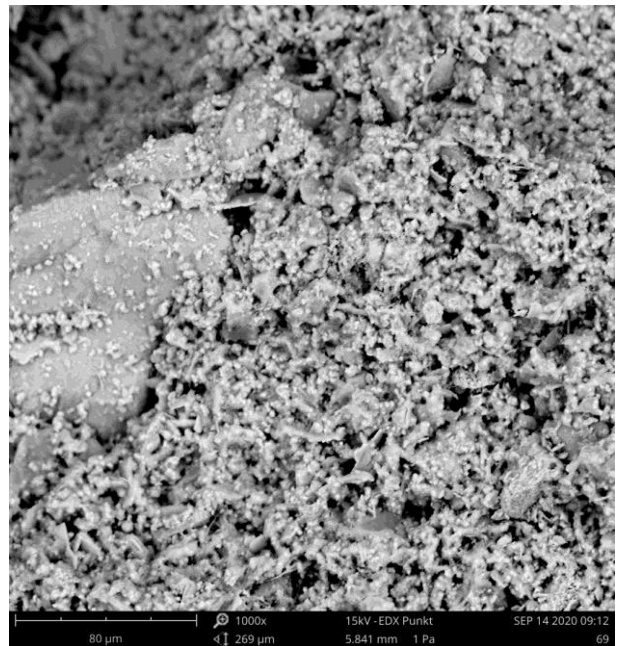


Abb. 82: REM-Aufnahme der hydratisierten Mörtelmischung 69

Die Abb. 83 zeigt das Referenzprodukt mit guter Wärmeleitfähigkeit im nassen Zustand ($1,02 \text{ W/m}^*\text{K}$) und nach 28 Tagen Lagerung im Normklima ($0,31 \text{ W/m}^*\text{K}$). Von allen untersuchten Materialien ist es das Material mit dem geringsten Gesamtporenvolumen ($0,19 \text{ cm}^3$ Quecksilber pro Gramm Probenmaterial). Die anteilige Aufteilung der Porengrößen liegt in der gleichen Größenordnung wie die der eigenen Versuchsmischungen.

Die andere getestete Referenzmischung (Abb. 84) zeigt einen hohen Gesamtporengehalt ($0,497 \text{ cm}^3$ Quecksilber pro Gramm Probenmaterial) mit einem hohen Anteil feiner Poren $< 3 \mu\text{m}$ (96,2 %) und einem geringen Anteil Poren zwischen 8 und $150 \mu\text{m}$. Die Wärmeleitfähigkeit liegt im nassen Zustand bei $0,68 \text{ W/m}^*\text{K}$ und nach Lagerung im Normklima bei $0,54 \text{ W/m}^*\text{K}$, es besteht also nur ein geringer Unterschied zwischen beiden Messungen.

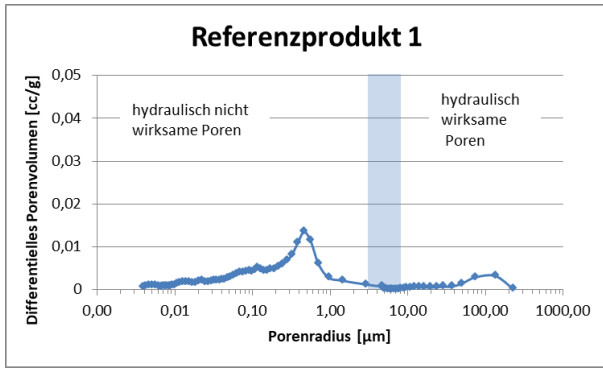


Abb. 83: Porenöffnungsverteilung der wärmeleitfähigen Referenzmischung

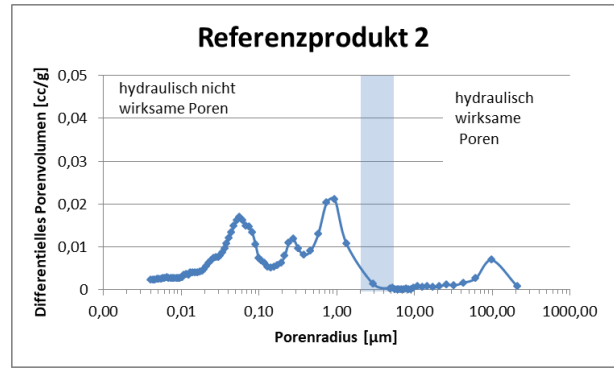


Abb. 84: Porenöffnungsverteilung einer Referenzmischung

Es konnte keine Abhängigkeit zwischen dem Porenvolumen/der Porengrößenverteilung und den Wärmeleitfähigkeiten der nassen, trockenen und aus dem Normklima stammenden Proben gefunden werden (Abb. 85 - Abb. 90). Der Anteil der hydraulisch wirksamen Poren liegt bei allen Proben unter 10 % und die gemessene Wärmeleitfähigkeit liegt mit dem Mittel von 1,12 W/m*K über der von Wasser mit 0,56 W/m*K und Luft mit 0,026 W/m*K.

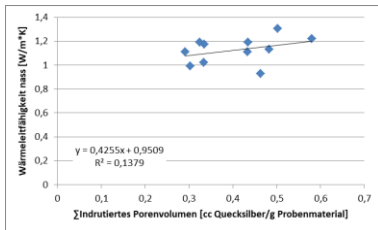


Abb. 85: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wasser-gesättigter Proben und dem Gesamtporenvolumen der Mörtelproben

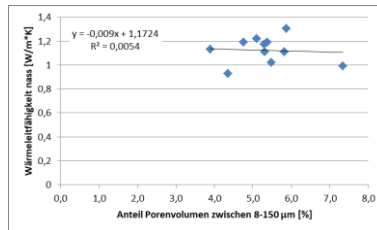


Abb. 86: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wasser-gesättigter Proben und dem Anteil des hydraulisch wirksamen Porenvolumens zwischen 8 – 150 µm

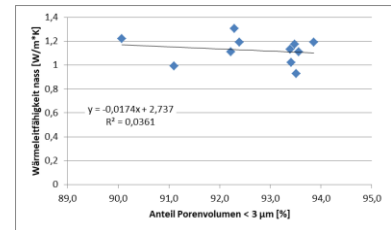


Abb. 87: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wasser-gesättigter Proben und dem Anteil des hydraulisch nicht wirksamen Porenvolumens < 3 µm

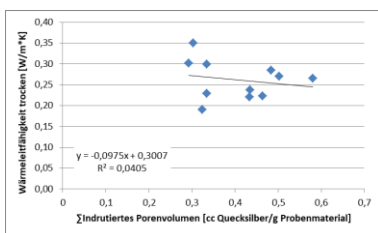


Abb. 88: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit wasser-gesättigter Proben und dem Gesamtporenvolumen der Mörtelproben

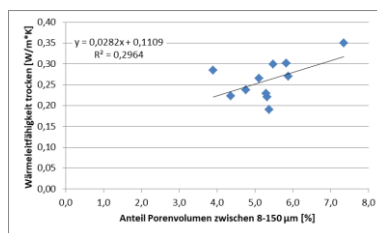


Abb. 89: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit trockener Proben und dem Anteil des Porenvolumens zwischen 8 – 150 µm

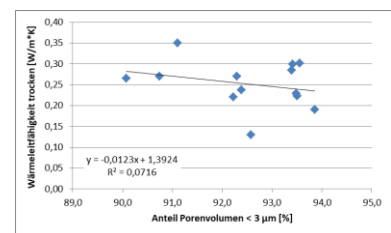


Abb. 90: Abhängigkeit zwischen der Wärmeleitfähigkeit trockener Proben und dem Anteil des Porenvolumens < 3 µm

9 Wasserdurchlässigkeitswert

Proben zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitswertes wurden anhand einer verhältnismäßig hohen Wärmeleitfähigkeit und dem Zusatz verschiedener Wärmeleitfähigkeitsadditive ausgewählt. Keine Rezeptur erfüllt die Vorgaben aus der VDI-Richtlinie 4640 von $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Alle getesteten Rezepturen gelten nach den Messungen als sehr schwach bis schwach durchlässig (Tabelle 12).

In Untersuchungen an verschiedenen Verfüllbaustoffen erfüllten die dort getesteten Mischungen die Durchlässigkeitsbeiwerte erst nach 50 bis 300 Tagen [12]. Bei einer puzzolanischen Reaktion des Trasses könnte auch bei den hier untersuchten Mischungen eine Abnahme der Durchlässigkeit über die Zeit auftreten. Aus Gründen der Projektdauer konnten wiederholte Versuche zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb des Projektes nicht durchgeführt werden.

Tabelle 12: Wasserdurchlässigkeitswert spezifischer Mischungen und dazugehöriger Trassgehalt

Mischung	Additiv	Trassgehalt [%]	Durchlässigkeitswert [m/s]
32	Diabas	0	9,24E-07
35	Leitfähigkeitsgraphen	20	5,48E-07
47	Vorwärmerkalk	18	7,15E-08
64	-	0	8,89E-08
69	Leitfähigkeitsgraphen	21	3,89E-07
71	Edelkorund	21	2,97E-07

10 Mischverfahren

10.1 Definition von relevanten technologischen Kenngrößen zur Auswahl der Mischverfahren

Die Aufgaben der Mischtechnologien bestehen darin, ein homogenes Gemenge zu erzeugen. Um dies realisieren zu können, sind nachfolgende Kenngrößen bei der Auswahl des Mischverfahrens zu beachten.

Mischzeit

Die Mischzeit, angegeben in Minuten, ist die Spanne vom Einfüllen der einzelnen Komponenten bis zur vollständigen Homogenisierung des Gemenges. Wird der Mischvorgang über diesen Zeitpunkt hinaus fortgeführt, kann es zu Entmischungserscheinungen kommen.

Drehzahl des Mixers

Die Drehzahl des Mixers, in Umdrehungen pro Minute, ist die Geschwindigkeit, mit welcher das Gemenge gemischt wird. Hierbei wird ein Drehzahlbereich angegeben, bei welchem keine Entmischungserscheinungen auftreten. Sowohl zu hohe Drehzahlen, als auch zu niedrigen Drehzahlen können zu Entmischungserscheinungen führen.

Einfüllmenge und Mischervolumen

Die Einfüllmenge bzw. das Mischvolumen ist die Menge in m^3 welche in den Mischer zum Mischprozess gegeben wird und sich aus den Teilmengen der einzelnen Komponenten zusammensetzt. Sie ist ausschlaggebend für die Dimensionierung des Mixers. Die Einfüllmenge und somit das Volumen des Mixers müssen so konzipiert sein, dass in der angestrebten Mischzeit die Ausgangsmaterialien zu einem homogenen Gemenge verarbeitet werden können und der Betrieb der Anlage ökonomisch ist.

Art und Ausstattung des Mixers

In verschiedenen Wirtschaftszweigen kommen unterschiedliche Mischtechniken zum Einsatz. Die Art des Mixers ist abhängig vom eingesetzten Ausgangsmaterial. Besonderen Einfluss haben die Korngrößenverteilung und die Eigenfeuchte.

Bei der Ausstattung geht es darum, den Mischvorgang effizient zu gestalten, dies bedeutet, mit Hilfsmitteln wie Abstreicher und Rührwerksgeometrie den Mischvorgang zu vereinfachen und vollständig durchführen zu können.

10.2 Auswahl und Untersuchungen an geeigneten Mischsystemen

Um einen Überblick über die Eignung der verschiedenen Mischverfahren zu erhalten, wurden Untersuchungen an verschiedenen Mixern aus den unterschiedlichsten Einsatzgebieten hinsichtlich ihrer Mischwirkung durchgeführt. Nachfolgend werden die einzelnen Systeme beschrieben und ihre Vor- und Nachteile erläutert.

10.2.1 Freifallmischer (handelsüblicher Betonmischer)

Der Freifallmischer besteht aus einer runden, senkrecht stehenden Trommel, welche durch einen Motor angetrieben wird (Abb. 91). In dieser Trommel sind „Metallschaufeln“ symmetrisch angebracht, welche zum Transport des Gemenges dienen. Der Mischer wird durch eine Öffnung in der Trommel beschickt. Das Gemenge wird durch die „Metallschaufeln“ vom unteren Teil der Trommel bis in den Scheitel des Behälters befördert und dort löst es sich durch die Schwerkraft und fällt in den unteren Teil der Trommel zurück.

Von Nachteil ist die unzureichende Mischwirkung des Systems. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Trommel sich in ihrer Gesamtheit dreht und sich keine rotierenden Teile im Inneren befinden. Somit besteht die Möglichkeit des Anlagerns von Gemengeteilen, welche in pulverförmigen Zustand beigemengt werden, an der Mischerwand oder an den „Metallschaufeln“.



Abb. 91: Freifallmischer

10.2.2 Schneckenpumpen

Schneckenpumpen sind geeignet zum Mischen und Fördern von Estrich-, Sand-, Riesel- und Feinbeton bis 16 mm Körnung (Abb. 92).

Das Mischwerkzeug besteht aus verschleißarmem Spezialguss. Das Mischwerk wird hydraulisch angetrieben und ist mit Vor- und Rückwärtslauf ausgestattet. Es verfügt über mehrstufige, verschleißfeste PM-Mischerwellenabdichtung. Die Verschleißbleche sind auswechselbar. Der Mischbehälter verfügt über einen Deckelverschluss mit Sicherheitsverriegelung und Zwangsentlüftung. Zusätzlich kann das Gerät mit hydraulisch betätigtem Beschicker mit 150 l Inhalt und Zwischentrichter zur getrennten Zugabe von Zement ausgerüstet werden.



Abb. 92: Schneckenpumpe

Die Schneckenpumpe besteht aus einer Mischeinheit (Abb. 93) und einer Fördereinheit (Abb. 94). Beide Einheiten werden über einen Dieselmotor angetrieben.



Abb. 93: Mischeinheit



Abb. 94: Fördereinheit

Die Ausgangsstoffe werden über einen Rost, welcher zur Begrenzung der Korngröße dient, aufgegeben.

Der Nachteil dieser Konstruktion liegt bei fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllmaterialien darin, dass Flüssig- und Festkomponenten über das gleiche System aufgegeben werden und es somit zu Anhaftungen und Klumpenbildung kommen kann. Der Mischbehälter müsste so verändert werden, dass die flüssige Komponente, das Anmachwasser, über ein Leitungssystem kontinuierlich zu dosiert wird.

Das Mischwerkzeug hat die Form einer Spirale und überträgt damit eine relativ geringe Scherkraft auf das Mischgut, was bei Estrich zur vollständigen Durchmischung ausreicht. Bei fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllmaterialien reicht diese Scherkraft auf Grund der höheren bindigen Anteile in der Mischung nicht aus. Es sind konstruktive Veränderungen an der Form und an der Rotationsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge notwendig.

Die Fördereinheit besteht aus einer Schnecke, welche das Gemenge mischt und gleichzeitig zum Einpressschlauch befördert. Wie in Abb. 94 sichtbar, befindet sich oberhalb der Förderschnecke ein Stahlsieb, womit Korngrößen > 4 mm abgesiebt werden. Dieses ist notwendig, da die Schnecke und die dazugehörigen Lager nur für diese Korngrößen ausgelegt sind.

Die Versuche sind mit verschiedenen Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Korngrößenverteilung durchgeführt worden. Die ungleichförmige Korngrößenverteilung der Zuschlagstoffe führte hierbei zu Entmischungerscheinungen und es bildete sich zwischen Schlauchwandung und Gemenge ein Schmierfilm aus Plastifikator und Wasser (Abb. 95), welcher im Schlauch eine Gleitwirkung erzeugte.



Abb. 95: Gemengeaustritt am Pumpenschlauch

10.2.3 Trommelfahrmischer

Trommelfahrmischer werden zum Transport und Mischen des Betons vom Betonwerk zur Baustelle eingesetzt. Durch eine Rotationsbewegung wird das Gemenge durchmischt und es bewirkt eine Verzögerung des Ansteifungsprozesses.

In der Trommel sind Bleche schneckenförmig angeordnet, je nach Drehrichtung der Trommel erfolgt eine Durchmischung oder ein Austragen des Gemenges.

Bei Eignungsuntersuchungen wurde der Fahrmischer mit einem Bagger (Abb. 96) befüllt. Der Befüllvorgang dauerte 10 Minuten und der Mischvorgang ca. 3 min.



Abb. 96: Befüllung des Fahrmischers

Das Mischgut wurde anschließend in einen Graben eingefüllt und augenscheinlich auf Entmischungerscheinungen und Homogenität untersucht. Gleichzeitig wurde der Einfüllvorgang in den Graben aus technologischer Sichtweite betrachtet. Dabei konnte festgestellt werden, dass:

- partiell Konglomerate von unvermischten Ausgangsstoffen aufgetreten sind,
- ein teilweises Entmischen aufgetreten ist und
- der Einfüllvorgang nicht kontinuierlich, sondern schwallartig verläuft.

Durch die flüssige Konsistenz des Verfüllmaterials werden durch die schneckenförmig angeordneten Bleche in der Trommel nur geringe Scherkräfte auf das Ausgangsmaterial übertragen. Somit werden Teile des trockenen Ausgangsgemisches mit Wasser umhüllt und somit Klumpen gebildet. Es gelangen größere Stücke in den Graben und führen zur Inhomogenität des Verfüllmaterials.

10.2.4 Zwangsmischer

Zur Herstellung von Betonen und Mörtel werden Zwangsmischer in den verschiedensten Bauarten verwendet. Unterschiede bestehen in der Einbauweise, ob horizontal oder vertikal, der Anordnung der Rührwerkzeuge und der Ausstattung mit Zusatzteilen, wie Abstreifer u.ä.. Im Rahmen des Projektes sind zwei Zwangsmischer untersucht worden, ein horizontal eingebauter Mischer mit Abstreifer und ein vertikal eingebauter Mischer mit Abstreifer und Wirbler.

10.2.4.1 Zwangsmischer – horizontaler Einbau

Dieser Mischer besteht aus einem horizontal liegenden, tonnenförmigen Mischkörper in dem zentral gelagert eine Welle angetrieben wird (Abb. 97). Auf dieser Welle sind schneckenförmig Stahlplatten angeordnet, welche das Gemenge durchmischen. An den Enden der Stahlplatten sind Abstreifelemente angebracht, damit Ablagerungen von Zuschlagstoffen im Mischkörper vermieden werden.

Das Fassungsvermögen des Mixers beträgt 1 m³ und es wurde mit einer Drehzahl von 20 U/min. gemischt. Die Zuführung der Zuschlagstoffe erfolgt über einen Aufzug und die Dosierung von Zement über Förderschnecken. Die Befüllzeit für 1 m³ Boden-Mörtel beträgt ca. 1,5 min. und die Mischzeit ca. 2 min.



Abb. 97: Zwangsmischer – horizontaler Einbau

Nach dem Mischvorgang wurde das Mischgut auf Homogenität untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass keine Entmischungserscheinungen aufgetreten sind. Außerdem wurden das Ausbreitmaß, als Größe für die Verarbeitbarkeit, ermittelt und Probekörper zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit hergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Mischprinzip eine gleichmäßige Qualität gesichert werden kann.

10.2.4.2 Zwangsmischer – vertikaler Einbau

Der Zwangsmischer mit vertikal eingebauten Mischwerkzeugen besteht aus einem runden Mischbehälter mit zentrisch laufender Welle, an der Mischarme befestigt sind. An diesen Mischarmen sind wechselseitig Abstreifer und Wirbler (Abb. 98) angeordnet. Die Abstreifer verhindern das Absetzen der Ausgangsstoffe an der Mischerwand und die Wirbler erzielen eine zusätzliche Vermischung des Gemenges. Der Mischer wird über einen Beschicker befüllt und fasst 1 m³ Verfüllmaterial. Das Rührwerkzeug dreht sich mit ca. 23 U/min. Der Befüllvorgang und der Mischvorgang dauern jeweils ca. 1 min.

Das Gemenge wurde nach dem Mischprozess auf seine Qualität untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass:

- keine Entmischungserscheinungen aufgetreten sind und
- eine gleich bleibende Qualität gesichert werden kann.



Abb. 98: Detailaufnahme des Wirblers

10.2.5 Horizontalmischer HTC 140

Der Mischer besteht aus 3 Baueinheiten, dem Antrieb, der Steuereinheit und der Mischeinheit. Die 3 Baueinheiten sind in Abb. 99 dargestellt.



Abb. 99: Horizontalmischer HTC 140

Der Mischer wird mit einem 11 kW Motor angetrieben, welcher mit der Mischeinheit über eine Welle verbunden ist.

Im Mischraum, welcher je nach Rezeptur ein Nutzvolumen von 15 ... 90 l besitzt, befinden sich 2 unterschiedliche Mischwerkzeuge (Abb. 100). Zum Einen das Hauptmischwerkzeug als Paddel auf einer Welle sitzend und zum Anderen einen Wirbler in 8 Uhr Position. Der Betrieb der Mischwerkzeuge kann gleichzeitig erfolgen oder jedes Mischwerkzeug kann für sich arbeiten.



Abb. 100: Anordnung der Mischwerkzeuge

Die Mischversuche mit dem Horizontalmischer sollen Aufschluss über das Mischprinzip und die Eignung zur Herstellung von fließfähigen Verfüllmaterialien geben. Die Versuchsreihen wurden so gestaltet, dass die verschiedensten Variationsmöglichkeiten von technologischen Parametern getestet und auf ihre Wirkung beurteilt werden konnten.

Die Versuche wurden in 2 Versuchsgruppen eingeteilt (siehe Tabelle 13):

- Versuchsgruppe 1: Variation der Mischzeit
- Versuchsgruppe 2: Variation der verwendeten Mischwerkzeuge.

Die Zugabe des Verfüllmaterials erfolgte über den Einfüllstutzen mit einem Durchmesser DN 200 am oberen Teil des Mischbehälters. Für die Entleerung des Mischbehälters ist an der Unterseite des Behälters ein Stutzen mit einem Verschlussmechanismus vorgesehen.

Tabelle 13: ausgewählte Ergebnisse der Mischeruntersuchung

Versuchs-Nr.	Mischzeit [sek.]	Ausbreitmaß [mm]	verwendete Mischwerkzeuge	Bemerkungen
M 01_01	15	580	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 01_02	30	590	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 01_03	15	570	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 01_04	30	580	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 02_05	15	560	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 02_06	30	570	Paddel + Wirbler	homogene Mischung
M 02_07	10	570	Paddel	homogene Mischung
M 02_08	15	580	Paddel	homogene Mischung
M 02_09	10	570	Wirbler	geringfügige Nesterbildung
M 02_10	15	580	Wirbler	geringfügige Nesterbildung

Die Versuche mit dem Horizontalmischer der Baureihe HTC 140 führte zu positiven Mischergebnissen. Die einzelnen Versuche haben ein homogenes Gemisch des Verfüllmaterials ergeben (Abb. 101).

Lediglich beim Einsatz des Wirblers als einziges Mischwerkzeug konnten an verschiedenen Stellen des Mischraumes ungemischte Anteile der Ausgangsstoffe festgestellt werden.

Eine Verlängerung der Mischzeit von 15 sek. auf 30 sek. hat keinen qualitativen Einfluss auf das Endprodukt.

Zur gleichen Erkenntnis gelangt man bei den Versuchen mit veränderter Reihenfolge der Zugabe der Einzelkomponenten (Fertiggemisch und Wasser).

Wie in Abb. 102 zu erkennen ist, gibt es im Bereich des Wirblers eine Zone, in der sich Mischgut anlagert und nicht weiter transportiert wird. Konstruktiv ist es notwendig, die Anordnung des Wirblers dahin gehend zu verändern, dass jeder Teil des Mischraumes von den Mischwerkzeugen erfasst werden kann.

Das Mischprinzip des Horizontalmischers ist zur Herstellung der Verfüllbaustoffe geeignet.



Abb. 101: Mischer mit Mischgut



Abb. 102: Inhomogene Mischzone hinter dem Wirbler

Fazit/Schlussfolgerung

Grundsätzlich sind die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt durchaus ermutigend. Trass und Tuffsand lassen sich für ein wärmeleitfähiges Verfüllmaterial einsetzen, können Zement aber nicht komplett ersetzen. Mit Ausnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes können die getesteten Anforderungen (VDI-Richtlinie 4640) an das Verpressmaterial erfüllt werden.

Dauerhaftigkeitsprüfungen, wie der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, sowie betonaggressive Grundwässer wurde in dieser Projektphase noch nicht getestet, da keine Mischung mit gewünschter Wärmeleitfähigkeit von $3,0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ entwickelt werden konnte und sich die Projektbearbeitung im laufenden Betrieb auf die erhöhte Wärmeleitfähigkeit fokussierte.

Die erzielten Eigenschaften des entwickelten Verfüllmaterials (z.B.: Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit, Marshzeit) entsprechen den der wärmemodifizierten Referenzmaterialien.

Durch Trass und Tuffsand kann keine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit oder des Wasserhaltevermögens erreicht werden. Im Projekt trugen nur Materialien die keine Rest- oder Anfallstoffe sind, wie Leitfähigkeitsgraphen oder Korund, zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit bei.

In der Projektbearbeitung zeigte sich, dass sich verschiedene einzuhaltende Kriterien gegensätzlich verhalten. In der Literatur wird zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit der Einsatz eines möglichst groben Größtkornes empfohlen, um Phasenübergänge zwischen den Zuschlägen zu minimieren. Bei einem Auslauftrichter von $4,76 \text{ mm}$ und einer Auslaufzeit von $50 - 100 \text{ s}$ kann das Größtkorn nicht über 2 maximal 3 mm liegen, diese geringe Korngröße bedingt wiederum eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Der Vergleich von Marsh-Zeit-Kriterium und Wasserabsetzmaß zeigt, dass sich auch dort die beiden Kriterien gegensätzlich verhalten. Die Erwartung bei erhöhtem Wassergehalt wäre beispielsweise geringere Marshzeiten aber gleichzeitig auch ein erhöhtes Absetzmaß.

Literaturverzeichnis

- [1] Röser, F.: Über die Reaktivität von Betonzusatzstoffen -Ein versuchsbasiertes Hydrationsmodell. Dissertation. Technische Universität Darmstadt (2018).
- [2] Trümer A.: Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft – Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar (2019).
- [3] VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. VDI Handbuch Energietechnik – VDI Handbuch Wärme-/Heiztechnik; VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), (2019).
- [4] Bergold, S.T.; Goetz-Neunhoeffer, F.; Neubauer, J.: Interaction of silicate and aluminate reaction in a synthetic cement system: Implications for the process. In: *Cement and Concrete Research* 93 (2017), S. 32–44
- [5] Schließer, A.E.: Warmbeton – Mischungsentwicklung mit verbesserter Übertragbarkeit in den Realmaßstab. Dissertation, Universität Stuttgart (2019)
- [6] Stengel, T.; Lowke, D.; Schiessl, P.; Gehlen, Chr.: UHPC mit alternativen Zusatzstoffen - Rheologie und Faserverbund. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 1, S. 31–38
- [7] Lange, F.; Mörtel, H.; Rudert, V.: Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. In: *Cement and Concrete Research* 27 (1997), S. 1481–1488
- [8] Wolf, M.: Optimierung von Ultra-Hochleistungsbeton zur Verwendung als Konstruktionsmaterial für statisch-konstruktive Vacuum Insulated Wall (VIW-) Elemente. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2016).
- [9] Huß A.: Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation, Materialprüfanstalt Universität Stuttgart (2010).
- [10] Brouwers, H. J. H.: Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. In: *Phys. Rev. E* 74 (3), S. 031309-1 - 031309-14. DOI: 10.1103/PhysRevE.74.031309, (2006).
- [11] Busch, K.F.; Luckner, I.: Geohydraulik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1973).
- [12] EWS-tech: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-tech (Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie), Autoren: Riegger, M.; Rolker, J.; Stober, I.; Steger, H.; Haist, M.; Eckhardt, J.-D.; Schlager, P.; Zemann, M.; Zorn, R.; Huttenloch, P.; Stuttgart, Karlsruhe, (2017).