



Technischer Kurzbericht

«Grüner» Asphalt: ein Meilenstein zum klimaverträglichen Strassenbau

Version 2.0

Ausgabe 09.2025

Eine aktuelle Ausgabe dieses Dokuments finden Sie auf unserer Internetseite:

<https://www.bs.ch/tiefbauamt>

→ [Normen, Merkblätter, Wegleitungen](#)

Herausgeber

Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt
Tiefbauamt
Dufourstrasse 40/50
CH-4001 Basel

Ausgabe vom 29. September 2025
Version 2.0

Kontakt

Dipl. Ing. Kai Teschner
kai.teschner@bs.ch

Dipl. Ing. HTL Michael Schweizer
michael.schweizer@bs.ch

PhD Candidate Ronja Teschner
City St George's University London
ronja.teschner@citystgeorge-s.ac.uk

Dieses Dokument wird laufend mit unseren aktuellen Erfahrungen zu Pyrolysekohle-Asphalt ergänzt. Ergänzungen werden im Bericht mit einer Fussnote kenntlich gemacht.

Nachdruck – auch nur auszugsweise – nur unter Quellenangabe.

Einleitung

In vielen Ländern und Städten werden grosse Anstrengungen unternommen, den ökologischen Fussabdruck zu verbessern. So wurde am 27. November 2022 mit einer kantonalen Abstimmung in Basel-Stadt vom Souverän der Gegenvorschlag zur «Klimagerechtigkeitsinitiative» mit rund 64 Prozent angenommen. Darin wird der gesamten kantonalen Verwaltung bis 2030 und dem gesamten Kanton Basel-Stadt bis 2037 ein Netto-Null-Ziel verbindlich vorgegeben.

Deshalb wird in verschiedenen Bereichen intensiv nach Verbesserungen gesucht und diese nach Möglichkeit umgesetzt.

Ende 2021 entstand so die Idee, im Tiefbauamt in bituminösen Mischgütern mit Pyrolysekohle zu experimentieren und zu forschen. Mit einem Partner wurde die Idee weitergetrieben. Bald zeigte sich, dass Belag mit Pyrolysekohle verbesserte Eigenschaften aufweisen kann und zudem ein C-Senken-Potential vorhanden ist. Im Jahr 2022 konnte der erste Belag mit Pyrolysekohle grossflächig eingebaut werden. Der «Grüne Asphalt» war geboren.

Das vorliegende Dokument bietet einen Überblick über die bisherigen Erfahrungen. Ein wichtiges Ziel dieses Dokumentes ist, interessierten Stellen Ideen, Wissen und Unterstützung zur Verfügung zu stellen, damit weitere noch leistungsfähigere ökologische Beläge mit C-Senke erstellt werden können.

Das Dokument richtet sich gleichermassen an Auftraggebende, Planende, Forschende sowie an Unternehmungen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Management Summary	6
Funktionsweise	8
Pyrolysekohle	8
Form und Zusammensetzung von Pyrolysekohle.....	8
Zugabe im Mischwerk.....	9
Anwendbarkeit für AC B und AC T ab 16er Grösstkorn.....	10
Dimensionierung	11
Transport	11
Einbau und Verdichtung auf der Baustelle	11
Rezyklieren und stabiler Kohlenstoff	11
Pyrolysekohle und flüchtige organische Verbindungen (VOC)	12
Eingesetzte Prüfmethoden.....	12
Detailliert untersuchte Mischgüter	13
Stand der Technik	14
Pyrolysekohle-Asphalt: CO ₂ eq -Potential und Einflussfaktoren.....	16
Dosierung und Einbaumenge Pyrolysekohle-Asphalt.....	17
RC-Asphalt/Ausbauasphalt	17
Kohlenstoffgehalt in Pyrolysekohle	17
Analyse des effektiven C-Gehaltes im Mischgut und dessen Verteilung in der Mastix	18
Pilotprojekte	19
Umschlagplatz habö AG	19
Qualitativer Vergleich	20
St. Alban-Vorstadt, Basel.....	21
Freiburgerstrasse, Basel	22
Reservoirstrasse, Basel	23
Anforderungen des Kanton-Basel Stadt	24
EBC-Zertifizierung	24
Ausgangsmaterialien der Pyrolysekohle	24
Schadstoffuntersuchung auf PAK	24
Zulassung zum Kohlenstoffhandel	25
Wassergehalt.....	25
Pyrolysekohle als pyrogene C-Abscheidung und -speicherung	26
Schlussfolgerung.....	27

Anhang.....	28
Anhang 1: Potential PK-Asphalt Kanton Basel-Stadt	28
Anhang 2: Mischgutergebnisse Versuchsfläche.....	29
Anhang 3: Mischgutergebnisse PK-Probemischungen	30
Anhang 4: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, St. Alban-Vorstadt, Basel.....	32
Anhang 5: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, Freiburgerstrasse, Basel	33
AC F 22 – PK	33
AC T 32 H – PK.....	34
AC B 22 H - PK	35
Anhang 6: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, Reservoirstrasse, Basel	36
Anhang 7: Zusätzliche Untersuchungen KIT	37
Zusammenfassung der Performanceprüfungen.....	37
Literaturverzeichnis	41
Tabellenverzeichnis.....	43
Abbildungsverzeichnis.....	45

Management Summary

Basel-Stadt möchte eine Vorreiterrolle im Klimaschutz einnehmen und klimaneutral werden. Das bedeutet, dass der Kanton Basel-Stadt bis zum Jahr 2037 nur so viele Treibhausgase ausstossen darf, wie von natürlichen und technischen Senken absorbiert werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, eine Kombination aus Reduktion von Emissionen und Entfernung von CO₂-Äquivalenten (CO₂eq) aus der Atmosphäre mittels Negativemissionstechnologien (NET) zu verwenden. Das wegweisende Projekt «Grüner Asphalt» konzentriert sich auf die Entwicklung eines klimafreundlichen Asphaltmischguts, das sowohl die normierten mechanischen Anforderungen moderner Beläge erfüllt als auch langlebig ist. Dabei wird das nachhaltige Material Pyrolysekohle aus Biomasse als teilweiser Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen (Füller) verwendet. Es zeigt, dass innovative Lösungen im Strassenbau eine wichtige Rolle bei der Bewältigung zukünftiger Herausforderungen spielen und eine nachhaltige Entwicklung fördern können.

Pyrolysekohle im Asphalt: Ein Schritt zu nachhaltiger Infrastruktur

Die Einbindung von Pyrolysekohle in die standardisierten Strassenbeläge nach Schweizer Norm (AC B / AC T und AC F) stellt einen vielversprechenden Schritt in Richtung nachhaltiger Infrastruktur dar. Pyrolysekohle als Baustoff trägt dazu bei, den CO₂eq-Gehalt in der Atmosphäre zu reduzieren. Die Verwendung von Pyrolysekohle als Füllstoff in Asphalt verbessert gemäss den durchgeführten Testreihen die mechanischen Eigenschaften des Materials, insbesondere die Widerstandsfähigkeit gegen Spurrinnen, was zu einer längeren Lebensdauer der Strassen und damit zu Ressourcen- und Energieeinsparungen im städtischen Umfeld führen kann. Die Frost- und Tausalzbeständigkeit wird sich durch praktische Anwendung auf Dauer zeigen.

Der Einsatz von Pyrolysekohle in Asphalt ermöglicht eine verbesserte CO₂eq-Bilanz. Bei genügender Dosierung kann es als Negativemissionstechnologie eingesetzt werden. Das bedeutet, dass der Atmosphäre entzogenes CO₂ als Kohlenstoff gebunden wird. Das durchschnittliche C-Senken-Potential von Pyrolysekohle in Asphalt für den Kanton Basel-Stadt wird bis zum Jahr 2037 auf etwa 13'000 bis 14'000 Tonnen CO₂eq geschätzt (Anhang 1: Potential PK-Asphalt Kanton Basel-Stadt).

Eine typische Schicht für den Einbau von Pyrolysekohle-Asphalt im Kanton Basel-Stadt soll ein AC T 22 N mit 60 % Ausbauasphalt und 3 % Pyrolysekohle (Trockenmasse) werden. Es handelt sich dabei um eine Tragschicht, wie sie in Basel-Stadt häufig eingebaut wird. Bei der Herstellung dieses Belags fallen etwa 31 kg CO₂eq pro Tonne Belag an. Jedoch können durch die Verwendung von Pyrolysekohle etwa 54 kg CO₂ gespeichert werden, was zu einer negativen Bilanz von etwa -23 kg CO₂eq führt (Tabelle 1).

Die Anstrengungen zum "Grünen Asphalt" sind nur ein Puzzlestück von zahlreichen Massnahmen, welche zur Reduktion des CO₂-Ausstosses ergriffen werden.

Gemeinsame Anstrengungen für nachhaltigen Strassenbau: Partnerschaftlicher Erfolg

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis einer gemeinsamen Zusammenarbeit des Tiefbauamtes des Kantons Basel-Stadt und der Industriellen Werke Basel (IWB), welche die Pyrolysekohle bereitstellen sowie weiteren Partnern aus der Industrie. Durch die Zusammenarbeit von privater und öffentlicher Hand konnte dieses Projekt erfolgreich vorangetrieben werden.

Funktionsweise

Pyrolysekohle

Pflanzen entnehmen durch die Photosynthese CO_2 aus der Luft und lagern es im Laufe ihres Lebens in Form von Kohlenstoff ein. Wenn die Pflanzen verrotten oder verbrennen, wird dieser Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigesetzt und bildet unter anderem wieder CO_2 .^{1,2,3)}

Damit der Kohlenstoff nicht wieder in die Atmosphäre gelangt, können Pflanzen zu festem Kohlenstoff verkohlt werden.^{1,2,3)} Dies geschieht durch Pyrolyse. Diese so genannte Pyrolysekohle besteht dann zum grössten Teil aus organischen Kohlenstoffverbindungen. Der langzeitstabile^A und im Asphalt eingebundene Kohlenstoff wird also für sehr lange Zeit dem Kohlenstoffkreislauf entzogen.^{1,2,3,4)}

Pyrolyse beschreibt den Umwandlungsprozess organischer Stoffe wie Holz oder Pflanzenresten bei üblichen Temperaturen von 400 bis 700 °C unter weitgehendem Sauerstoffabschluss.³⁾ Der exotherme Prozess erfordert zunächst die Zufuhr von Energie, setzt aber anschliessend wieder Energie frei. Die überschüssige Wärme der Anlage kann, wie in Basel praktiziert, in Fernwärmenetze eingespeist werden. Die Nutzung der Pyrolyse ist also doppelt sinnvoll: Sie erzeugt Energie, die zum Beispiel für Fernwärme genutzt werden kann und es entsteht Pyrolysekohle.

Die Pyrolysekohle der IWB besteht zu rund 60 % aus reinem Kohlenstoff und hat ein C-Senken-Potential von rund 50 % Trockenmasse bezüglich dem ursprünglich in der Pflanze gebundenen CO_2 (Abbildung 1).⁵⁾ Aus einem Kilogramm Biomasse entstehen eine Kilowattstunde Fernwärme und 170 Gramm Pyrolysekohle.⁶⁾ Die Pyrolyse zu Pyrolysekohle ist also ein Verfahren, das der Atmosphäre langfristig CO_2 entzieht.

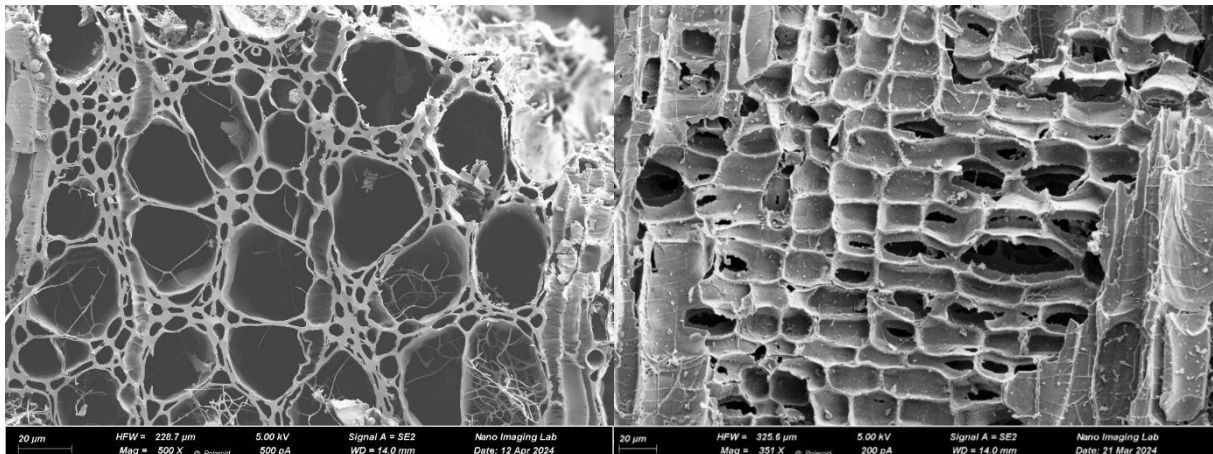


Abbildung 1 Pyrolysekohle aus Grünschnittabfällen Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450) Aufnahmen

Form und Zusammensetzung von Pyrolysekohle

Pyrolysekohle weist optisch ähnliche Strukturen auf wie das Ausgangsmaterial aus dem sie gewonnen wurde, jedoch verändern sich die chemischen Eigenschaften durch die Pyrolyse

^A Der international anerkannte Schwellenwert zwischen temporärer und permanenter Kohlenstoffspeicherung beträgt 100 Jahre (Artikel 6.4 Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104).

grundlegend.^{3,7)} Der Kohlenstoffgehalt in der Pyrolysekohle ist abhängig vom Ausgangsmaterial und der Temperatur sowie Verweilzeit im Pyrolysereaktor. Holzige Ausgangsmaterialien weisen mehr Gehalt an Kohlenstoff auf als z.B. Stroh, Trester oder Laub. Der Kohlenstoffgehalt nimmt zu mit steigender Temperatur und Verweilzeit im Pyrolysereaktor.³⁾ Pyrolysekohle kann je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess Schadstoffe erzeugen. Zum Beispiel können durch zu hohe Temperaturen im Pyrolysereaktor aus relativ harmlosen Stoffen wie Chrom III Schadstoffe wie Chromat (Cr VI) entstehen. Dabei können unterschiedliche Qualitäten von Pyrolysekohle entstehen.

Die Pyrolysekohle der IWB weist mehrheitlich eine Körnung von 0 – 8 mm auf (*Abbildung 2*).



Abbildung 2 Zertifizierte IWB-Pyrolysekohle in Rohform

Die IWB-Pyrolysekohle wird aus Landschaftspflegeholz aus einem Umkreis von 40 km um Basel gewonnen. Sie wird bei einer Pyrolysetemperatur von rund 680°C hergestellt und weist eine Schüttdichte von 207 kg / m³ (Trockensubstanz) Korngrösse < 3 mm auf. Der Wassergehalt der verwendeten Pyrolysekohle beträgt etwa 15 - 20 %. Die IWB-Pyrolysekohle ist EBC zertifiziert, sie ist qualitativ sehr hochwertig und gleichmässig. Es gibt keine Probleme bezüglich Schadstoffgehalten.

Zugabe im Mischwerk

Der Mischprozess im Asphaltmischwerk muss für die Herstellung von Pyrolysekohle-Asphalt je nach Lieferwerk angepasst werden. Derzeit wird die Pyrolysekohle meist noch manuell als Sackware direkt in den Mischer gegeben. Durch die Verlängerung der Mischzeit resultiert eine relativ homogene Zerkleinerung der Pyrolysekohle (*Abbildung 3*). Aus Sicherheitsgründen wurde die Pyrolysekohle bisher nicht in pulverisierter Form zugesetzt, um das Risiko einer Dampfdruckreaktion oder Staubexplosion zu vermeiden.

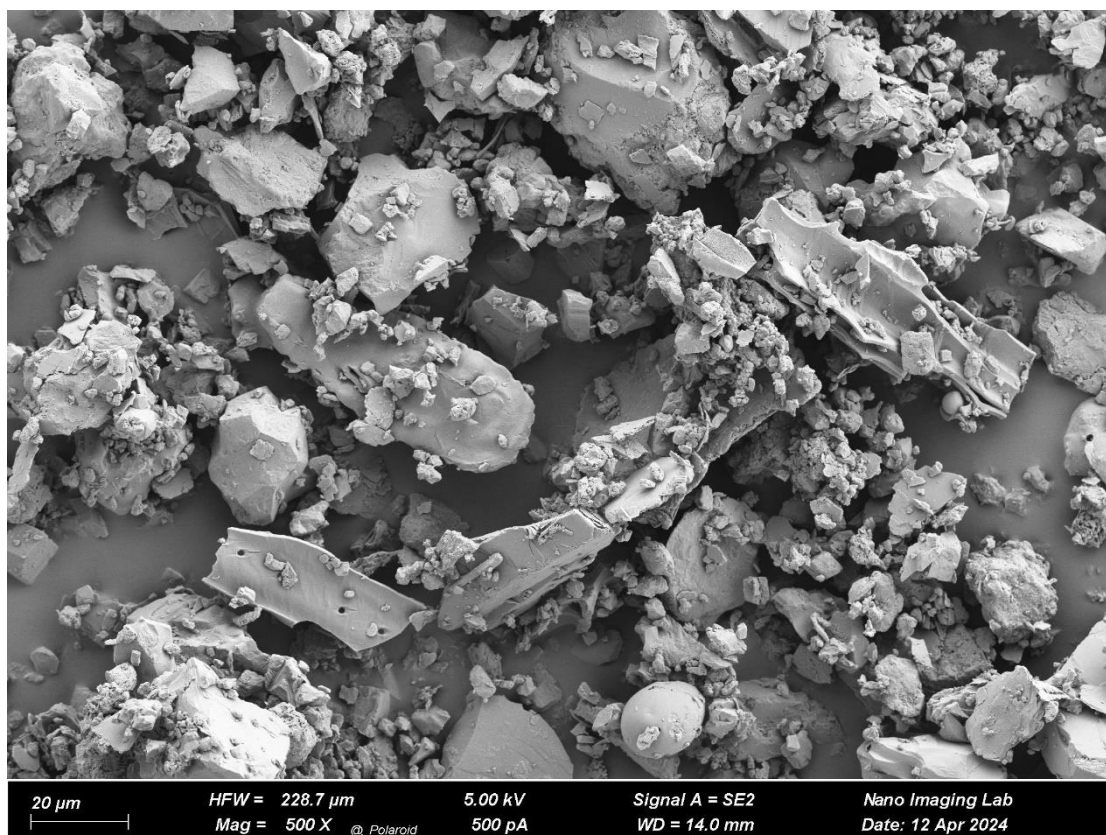


Abbildung 3 Rückgewonnener Füller aus Pyrolysekohle-Asphalt (3% dosiert)

Die manuelle Zugabe von Pyrolysekohle in den Mischer ist derzeit noch eine praktikable Methode zur Herstellung von hochwertigem Pyrolysekohle-Asphalt im Pilotbetrieb. Es sind mittlerweile effizientere mechanisierte und automatisierte Zugabemethoden entwickelt und angewendet worden.

Die Pyrolysekohle wird bei Lieferung an den Mischanlagen aktuell aus Sicherheitsgründen meist mit einem Wassergehalt von etwa 20 – 30 % angeliefert. Für industrielle Anwendungen (EBC-Rohstoff) sind niedrigere Wassergehalte zulässig. Bei der Dosierung im Mischwerk ist der Wassergehalt zu berücksichtigen, da sich die Menge der Pyrolysekohle von 2 – 4 % auf die Trockenmasse bezieht.

Anwendbarkeit für AC B und AC T ab 16er Grösstkorn

Die Verwendung von Pyrolysekohle-Asphalt erfüllt gemäss aktuellen Erfahrungen nur bestimmte Anforderungen bezüglich Gesteinskörnungen und sollte daher gezielt eingesetzt werden. Im Kanton Basel-Stadt werden für den Einsatz von Pyrolysekohle-Asphalt die Schweizer Normbeläge (SN-Beläge) AC B, AC T und AC F verwendet. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass Pyrolysekohle-Asphalt in seiner derzeitigen Form vor allem für Mischungen mit einem Grösstkorn von 16 mm oder grösser geeignet ist. Dies ist besonders wichtig, da bei feiner Gesteinskörnung aktuell nicht garantiert werden kann, dass eine homogene Mischung erreicht wird. Dies ergibt sich aus den begrenzten Möglichkeiten, die Pyrolysekohle in solchen Mischungen ausreichend zu zerkleinern und zu vermahlen.

Die Verwendung von Pyrolysekohle in der Deckschicht ist aufgrund der geringen Korngrösse und der spezifischen Funktionen, die die Deckschicht erfüllen muss, wie z. B. Lärmminderung

und semidichten Eigenschaften, aktuell noch nicht geplant. Aus diesem Grund wurde auf die Verwendung von Pyrolysekohle in Deckschichten bisher verzichtet.

Dimensionierung

In den Pilotflächen wurden dieselben Strukturwerte angenommen, wie für den jeweiligen Standardbelag. Der Strukturwert beträgt für die getesteten Asphalte 4 [1]. Es ist künftig zu prüfen, ob durch die erhöhte Standfestigkeit eine leichte Reduktion der Schichtstärke erfolgen kann. Beispielsweise ist es vorstellbar, bei erfolgreichen Versuchen die AC T 22 H PmB mit 8, anstatt 9 cm einzubauen.

Transport

Der Transport von Asphalt mit Pyrolysekohle unterscheidet sich nicht von normalem Walzasphalt. Es sind die üblichen Massnahmen zu ergreifen, wie beispielsweise Abdecken gegen Oxidation und Thermosilo bei kalter Witterung.

Einbau und Verdichtung auf der Baustelle

Die Pilotflächen wurden weitgehend maschinell mit Belagsfertigern eingebaut. Beim Einbau von Asphalt mit Pyrolysekohle ist eine leichte Anpassung der Verdichtung erforderlich. Basierend auf Erfahrungen und Erkenntnissen aus bereits durchgeführten Projekten konnte festgestellt werden, dass für die Verdichtung von Pyrolysekohle-Asphalt im Vergleich zu herkömmlichen Asphaltmischungen etwa 20% mehr Verdichtungsenergie erforderlich ist. Dieses Erkenntnis betont die Wichtigkeit einer genauen und angepassten Vorgehensweise beim Einbau von Pyrolysekohle-Asphalt.

Rezyklieren und stabiler Kohlenstoff

Recyclingasphalt hat eine deutlich bessere Ökobilanz als konventioneller Asphalt. Je höher die Recyclingquote, desto besser die Ökobilanz des Asphalts. Die Verbesserung der Treibhausgasbilanz von Recyclingasphalt gegenüber konventionellem Asphalt ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass beim Recycling von Asphalt Primärenergie und Primärmaterial eingespart wird. Der bereits vorhandene Asphaltbelag dient als Basis für den neuen Belag, wodurch der Bedarf an neuem Gestein und dessen Aufbereitung entfällt. Diese Methode schont somit wertvolle natürliche Ressourcen wie Gestein und Bitumen und führt zu einer deutlichen Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen bei der Herstellung.⁸⁾ Die Verwendung von Recyclingasphalt bei der Produktion ermöglicht nicht nur eine Reduktion der CO_2eq -Emissionen, sondern wirkt sich auch positiv auf den Energieverbrauch und den Gesteinsabbau aus. Zudem wird mit der Anwendung des Materialkreislaufprinzips die Entsorgung von Asphalt vermieden bzw. reduziert. Zudem werden Ressourcen sinnvoll genutzt, wodurch zusätzlich Emissionen eingespart werden.

Pyrolysekohle-Asphalt lässt sich ausserdem problemlos recyceln, ohne dass dabei die im Asphalt gespeicherten CO_2eq (in Form von Pyrolysekohle, Bitumen etc.) freigesetzt werden. Grund dafür ist, dass das Asphaltrecycling ein rein mechanischer Prozess ist, der bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 120 - 200 °C stattfindet. Im Gegensatz dazu erfolgt die Pyrolyse zur Herstellung der Pyrolysekohle bei weitaus höheren Temperaturen ab rund 400 °C.⁹⁾ Somit verbleiben Pyrolysekohle und Kohlenstoff auch nach dem Recycling im Asphalt. Es wird in Zukunft folglich auch Asphaltrecycling mit Pyrolysekohle geben. In Baustoffen

bleibt Kohlenstoff stabil und unterliegt keinem Abbau.¹⁰⁾ Aus diesem Grund kann der in Pyrolysekohle gebundene Kohlenstoff zu 100 % als Kohlenstoffsenske betrachtet werden.

Pyrolysekohle und flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Neben den Aspekten der verlängerten Lebensdauer bietet Pyrolysekohle-Asphalt weitere Vorteile. Aufgrund ihrer intrinsischen Porosität und Kohlenstoffnegativität kann Pyrolysekohle Alkane, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Sulfidverbindungen binden sowie flüchtige organische Verbindungen (VOC) absorbieren.¹¹⁾

Die Biokohle absorbiert einen Teil der VOC aus dem Bindemittel, wodurch die Fließfähigkeit des Bindemittels verringert und die Viskosität erhöht wird.¹²⁾ Durch die Adsorption und Rückhaltung der VOC kann die Luftqualität verbessert werden und gleichzeitig der Massenverlust des Bitumens verringert werden, der die Haltbarkeit des Asphalts beeinflusst.^{11,13)}

VOC verursachen nicht nur Umweltverschmutzung, sondern stellen auch eine ernsthafte Bedrohung für die menschliche Gesundheit dar.¹¹⁾ Sie sind einer der Hauptverursacher der globalen Erwärmung. Somit kann die Pyrolysekohle im Asphalt nicht nur zur Reduktion von CO₂-Emissionen und potenziellen Qualitätsverbesserungen von Asphalt, sondern auch zur Reduktion eines weiteren Treibhausgases beitragen.

Andere Formen von Kohlenstoff wie Aktivkohle, Kohlenstoffnanoröhren, Graphen und Graphenderivate sind ernsthafte Konkurrenten für Biokohle als Adsorptionsmittel für Luftschadstoffe.¹³⁾ Im Vergleich zu Aktivkohle, die effektiv als Adsorptionsmittel für Schadstoffe eingesetzt wird, wird Biokohle jedoch bei niedrigeren Temperaturen hergestellt, was dazu führt, dass der Preis von Biokohle nur 1/6 des Preises von kommerzieller Aktivkohle beträgt.¹³⁾

Eingesetzte Prüfmethode

Zur Ermittlung der technischen Eigenschaften von Pyrolysekohle-Asphalt wurden auf der Versuchsfläche Prüfungen durchgeführt. Der Prüfungsumfang orientierte sich an den Anforderungen einer Typenprüfung. Zusätzlich wurden an den Asphalten AC T 22 N dynamische Prüfungen («Spurbildungstest») durchgeführt, obwohl dies in den Schweizer Normen nicht gefordert ist. Damit konnte die Eignung für den Einbau im Strassenbau erfolgreich nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass das Mischgut auf seine Eignung für den Einsatz im Infrastrukturbau geprüft wurde. Geprüft wurde auf Bindemittelseigenschaften, Bindemittelmengen, Korngrößenverteilungen, Wasserempfindlichkeit und vor allem auf dynamische Prüfungen, also Verkehrssimulation im Labor im Zeitraffer, um die Langzeitstabilität des Mischgutes zu testen. Diese Prüfung wird unter klimatisch schwierigen Bedingungen bei 60 °C durchgeführt. Zur Überprüfung dieser Eigenschaften wurden im Labor folgende Prüfungen durchgeführt (Anhang 3: Mischgutergebnisse PK-Probemischungen):

- Löslicher Bindemittelgehalt inkl. Siebanalyse (SN EN 12697-1 / SN EN 933-1)
- Bestimmung der Rohdichte (Pyknometer und rechnerisch) (SN EN 12697-5)
- Marshall-Prüfung, Stabilität und Fließen mit Raumdichte, Hohlraumgehalt und Hohlraumfüllungsgrad (inkl. Herstellung der Prüfkörper) (SN EN 12697-6/8/30/34)
- Bestimmung der Wasserempfindlichkeit (SN EN 12697-12)
- Spurbildungstest LCPC (SN EN 12697-22 / SN EN 12697-33)
- Bindemittelrückgewinnung (SN EN 12697-3)
- Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel (SN EN 1427)

- Bestimmung der Nadelpenetration (SN EN 1426)
- Berechnung des Penetrationsindex (SN EN 12591)
- Elastische Rückstellung (SN EN 13398)
- Bestimmung PAK, Quantifizierung mit GC-MS (BAFU F-13/2017)
- Bestimmung des Schermoduls und Phasenwinkels mit dem DSR (DIN 52050 BTSV)

Zusätzliche Untersuchungen durch das KIT, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Strassen und Eisenbahnwesen, Prüfstelle nach RAP Stra:

- Abkühlversuch, TP Asphalt-StB, Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch Ausgabe 2022
- Einaxialer Zugversuch, TP Asphalt-StB, Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch Ausgabe 2022
- Spaltzug-Schwellversuch, TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1: Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Ausgabe 2012
- Spaltzug-Schwellversuch, TP Asphalt-StB, Teil 26: Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit, Ausgabe 2018
- Spaltzug-Schwellversuch, TP Asphalt-StB, Teil 24: Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung, Ausgabe 2018

Detailliert untersuchte Mischgüter

Folgende Mischungen wurden typenprüfungsähnlich untersucht und die wichtigsten Messwerte im Anhang 3: Mischgutergebnisse PK-Probemischungen zusammengestellt.

- 2 % Pyrolysekohle AC B 16 S B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B10094 ff.
- 2 % Pyrolysekohle AC T 22 N B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B8655 / B8656
- 2 % Pyrolysekohle AC T 22 H B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B9159-1-2-3-4
- 3 % Pyrolysekohle AC T 22 S PmB-E 25/55-65 (50 % RC) Probe-Nr.: B8938
- 4 % Pyrolysekohle AC T 22 H B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B8691 / B8692
- 4 % Pyrolysekohle AC T 22 S PmB-E 25/55-65 (50 % RC) Probe-Nr.: B8852
- 4 % Pyrolysekohle AC T 22 H PmB-E 25/55-65 (50 % RC) Probe-Nr.: B8751 / B8752
- 2.5 % Pyrolysekohle AC F 22 B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B10295 / B10297
- 2.5 % Pyrolysekohle AC B 22 H PmB-E 25/55-65 (50 % RC) Probe Nr.: B10363 ff.
- 2.5 % Pyrolysekohle AC T 32 H PmB-E 25/55-65 (50 % RC) Probe Nr.: B10294 ff.
- 2.5 % Pyrolysekohle AC T 22 S B50/70 (50 % RC) Probe-Nr.: B10183

Stand der Technik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden verschiedene Mischguttrezepturen mit Zugabemengen von 2 %, 3 % und 4 % Pyrolysekohle in unterschiedlichen Mischgutsorten (16er/22er Grösstkorn) hergestellt, beprobt und mehrere (erweiterte) Typenprüfungen durchgeführt. Alle Ergebnisse zeigen gute technische Eigenschaften, liegen innerhalb der Anforderungen der Norm und sind mindestens gleichwertig mit konventionellem Asphalt. Teilweise zeigen die Ergebnisse bessere qualitative Eigenschaften (siehe Anhang für Details).

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) GeminiSEM 450 wurden Aufnahmen gemacht, um die Mastix des Asphalts genauer zu untersuchen. Das Bild stammt von einem Marshallkörper mit 2 % Pyrolysekohle und wurde mit einer Vergrößerung von 20 - 300 μm aufgenommen. Diese Vergrößerung ermöglicht die Analyse der Strukturen und der Einlagerung der Pyrolysekohle in den Mastix und zeigt, dass diese weitgehend homogen verteilt ist (Abbildung 1Abbildung 4 & Abbildung 5).

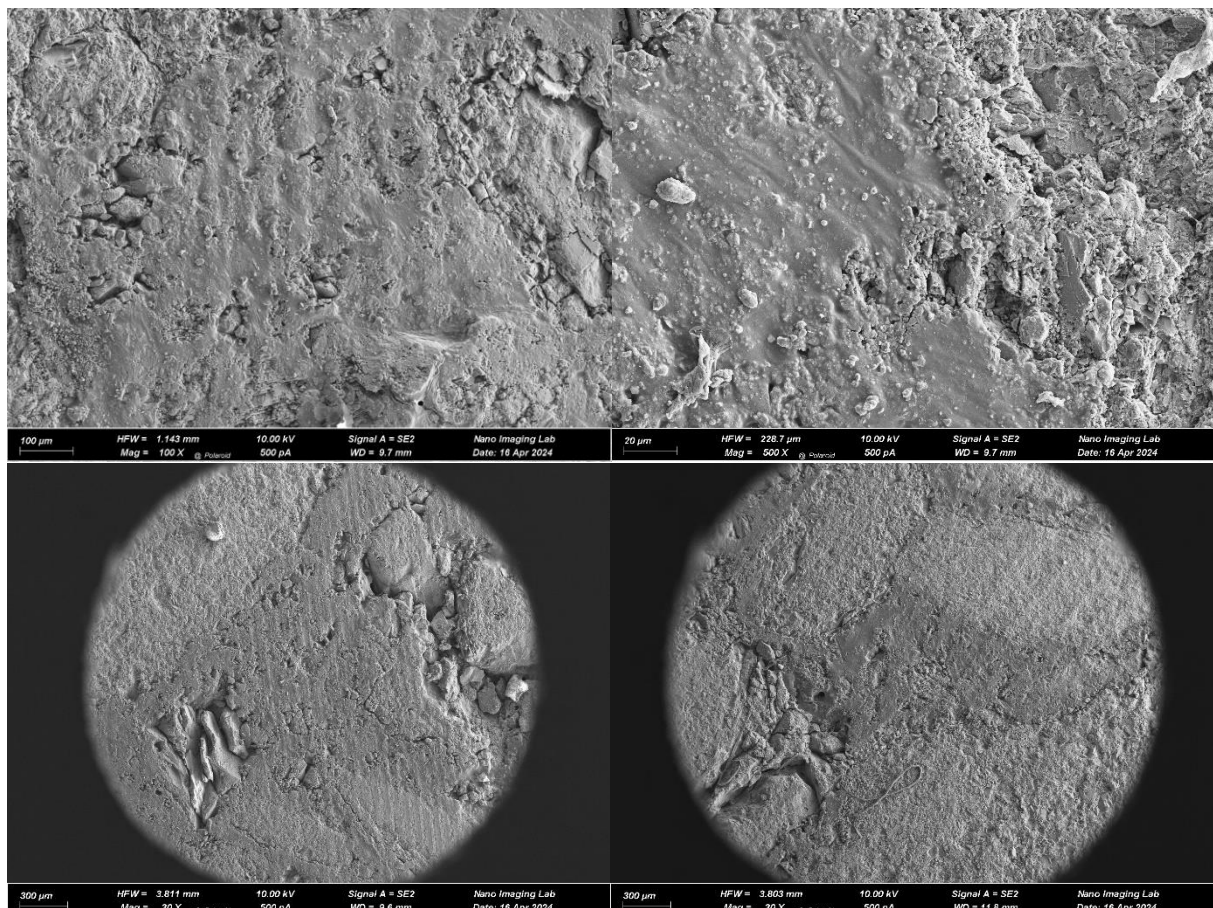


Abbildung 4 Marshall Körper Pyrolysekohle-Asphalt (2% Dosierung) unter dem Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450). Vergrößerung 100 μm (oben links), 20 μm (oben rechts), 300 μm (unten links und rechts)

Es ist ein nachhaltiger und wirtschaftlicher Ansatz, Strassen so langlebig wie möglich zu gestalten, wodurch die Notwendigkeit, die Strasse zu erneuern, verzögert wird. Durch die Zugabe von Pyrolysekohle als Asphaltfüllstoff werden voraussichtlich technische Vorteile erzielt und der Belag wird stabiler.¹⁴⁾ Dazu gehören eine verbesserte Wärmestandfestigkeit und Spurrinnenbeständigkeit (durch Erhöhung des komplexen Moduls, des Spurrinnenfaktors und des Viskositäts-Temperatur-Index).^{15,16,17,18)}

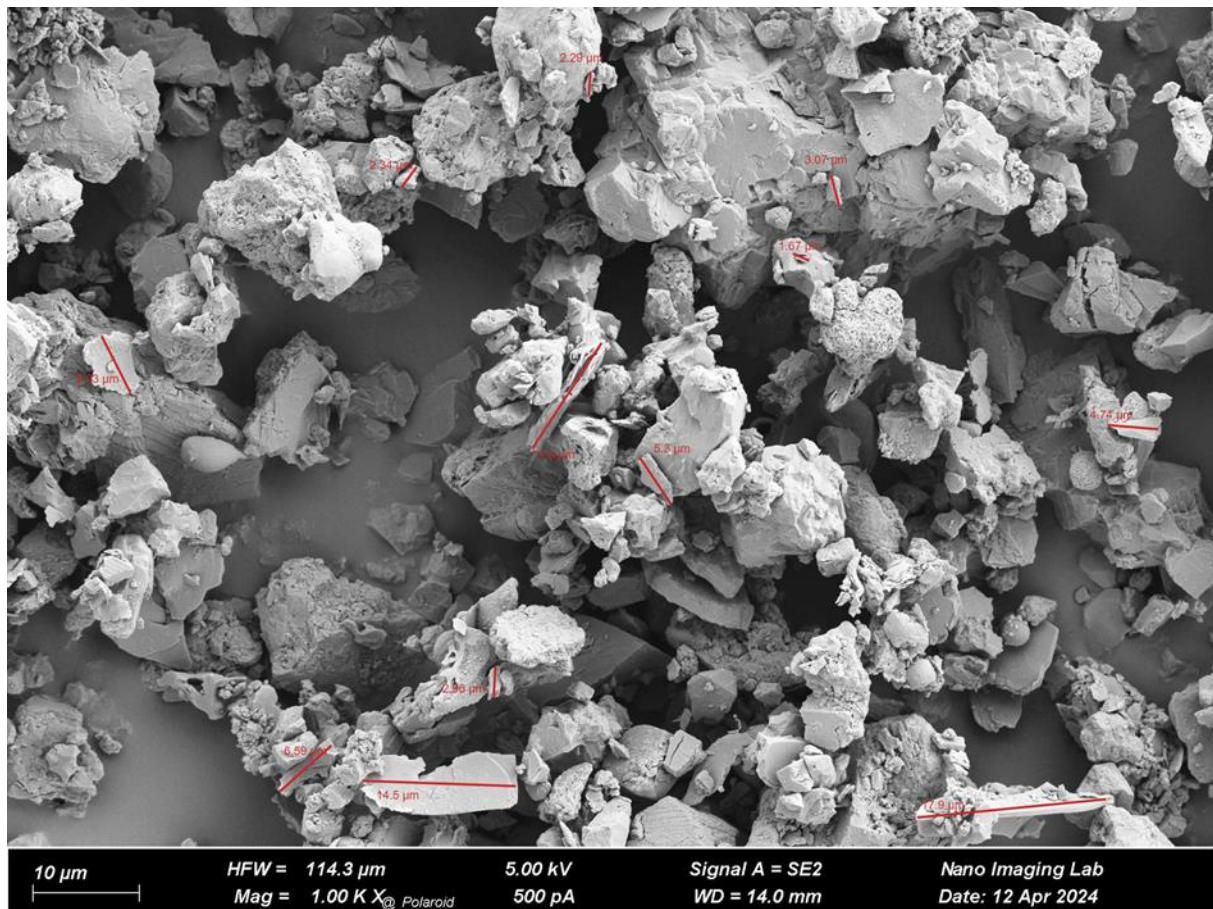


Abbildung 5 Füller Pyrolysekohle-Asphalt (2% Dosierung) unter dem Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450). Vergrößerung 10µm. Grösse der einzelnen Teile 1.6µm - 17.9µm

Zur langfristigen Haltbarkeit und Rissbeständigkeit können derzeit noch keine endgültigen Aussagen getroffen werden. Allerdings wird eine Verbesserung in diesem Bereich erwartet. Bei den bisher gezogenen Bohrkernen wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Die Langzeiterfahrungen werden weitere Erkenntnisse bringen. Für Deckbelagsmischgutsorgen wird aktuell noch keine Pyrolysekohle eingesetzt. Der Deckbelag schützt die Belagsschicht mit Pyrolysekohle vor Witterungseinflüssen wie Frost und Wasser sowie anderen schädlichen Einflüssen.

- Erfolgreiche Forschung: Es wurden verschiedene Pyrolysekohle - Mischungen (2 %, 3 %, 4 %) getestet. Die Ergebnisse zeigen gute technische Eigenschaften, erfüllen die aktuellen Normen und sind mindestens gleichwertig mit herkömmlichem Asphalt.
- Technische Eigenschaften: Pyrolysekohle verbessert die Asphaltstabilität, die Temperatur- und Spurrinnenbeständigkeit. Es besteht grosses Potential für eine verlängerte Nutzungsdauer.
- Die Kälteeigenschaften von Pyrolysekohle-Asphalt wurden untersucht und entsprechen den üblichen Erfahrungswerten von Asphalten ohne Pyrolysekohle. Die ermittelten Werte zeigen keine negativen Auswirkungen bei den Kälteeigenschaften.
- Sobald mehr Resultate aus Pilotflächen vorliegen, wird eine Reduktion der Schichtdicke für einige Belagstypen geprüft und vertieft untersucht.

Pyrolysekohle-Asphalt: CO₂eq -Potential und Einflussfaktoren

Unter C-Senke wird die aktive Entnahme und Bindung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre verstanden. Dabei handelt es sich um eine langfristige Speicherung von Kohlenstoff. Das Potential von Pyrolysekohle-Asphalt als C-Senke hängt wesentlich von vier verschiedenen Faktoren ab: die Menge an Asphalt, die mit Pyrolysekohle eingebaut werden kann, die Dosierung der Pyrolysekohle im Asphalt, der RC-Anteil im Pyrolysekohle-Asphalt und der Kohlenstoffgehalt, der in der Pyrolysekohle gebunden ist.

Für die Ökobilanz von Asphalt werden die Treibhausgasemissionen entlang der Produktionskette von der Rohstoffgewinnung über die Aufbereitung und den Transport bis zur Asphaltproduktion im Werk nach dem «cradle to gate»-Ansatz (von der Wiege zum Tor) aufsummiert. Dabei werden somit die ersten beiden Phasen des Produktlebenszyklus betrachtet. Diese vereinfachte Ökobilanz ist sinnvoll, da die Stabilität des Pyrolysekohle-Asphalts und die damit verbundene Lebensdauer und Instandhaltung der Strasse noch weiter erforscht werden muss und erst in den nächsten Jahren abschliessend beurteilt werden kann. Eine Ökobilanz-Betrachtung unter Berücksichtigung des Verschleisses des Belags und der Deponierung («cradle to grave») würde daher ein verzerrtes Bild ergeben.

Die Ökobilanz verwendet Referenzwerte aus der wissenschaftlichen Literatur.^{16,17,18,19,20} Es wurde die Bilanz verschiedener Asphaltrecyclingquoten betrachtet und die fehlenden Recyclingquoten für dieses Projekt wurden anhand der Literatur interpoliert. Die Bilanzierung erfolgte nach der ISO-Norm 14040. Die Ergebnisse dienen als Referenz für das Reduktionspotential von Pyrolysekohle-Asphalt hinsichtlich CO₂eq. Die Ergebnisse basieren auf wissenschaftlicher Literatur und es wurden keine Einzeluntersuchungen von Asphaltmischwerken in der Region Basel durchgeführt. Um die genaue CO₂eq-Bilanz für ein Mischwerk zu ermitteln, ist eine Lebenszyklusanalyse für den Einzelfall erforderlich. In Tabelle 1 werden die bei der Herstellung von Asphalt entstehenden CO₂eq-Emissionen pro Tonne in Kilogramm CO₂eq angegeben. Die Werte liegen zwischen 30,9 und 53.8 kg CO₂eq/t Asphalt (Tabelle 1).

Die CO₂eq-Bilanz von Pyrolysekohle-Asphalt ergibt sich aus den Emissionen der Rohstoffgewinnung und der Asphaltproduktion bis zum Werkstor, abzüglich des Netto-C-Senken-Potentials der eingesetzten Pyrolysekohle (siehe Tabelle 1). Eine gängige Tragschicht für die Anwendung von Pyrolysekohle-Asphalt im Kanton Basel-Stadt soll ein AC T 22 N mit einem Recyclinganteil von 60 % und einem Pyrolysekohle-Anteil von 3 % (bezogen auf die Trockenmasse) sein. Die Produktion verursacht etwa 31 kg CO₂eq pro Tonne Belag. Die Verwendung von Pyrolysekohle kann etwa 54 kg CO₂ speichern und führt zu einer negativen Bilanz von etwa -23 kg CO₂eq. Es ist zu beachten, dass es sich bei den gegebenen Werten lediglich um Referenzwerte handelt, die je nach Ökobilanzansatz und Mischwerk im Einzelfall stark variieren können.

Bezeichnung	RC-Anteil %	CO ₂ eq emittiert / Tonne Asphalt 16-19	Netto C- Senken Potential PK (2%) ⁵	CO ₂ eq Bilanz (2%)	Netto C- Senken Po- tential PK (2.5%) ⁵	CO ₂ eq Bilanz (2.5%)	Netto C- Senken Po- tential PK (3%) ⁵	CO ₂ eq Bilanz (3%)	Netto C- Senken Potential PK (4%) ⁵	CO ₂ eq Bilanz (4%)
RC0	0%	53.8	36	17.8	45	8.8	54	-0.2	72	-18.2
RC30	30%	38.3	36	2.3	45	-6.7	54	-15.7	72	-33.7
RC40	40%	35.9	36	-0.1	45	-9.1	54	-18.1	72	-36.1
RC45	45%	34.7	36	-1.3	45	-10.3	54	-19.3	72	-37.3
RC50	50%	33.5	36	-2.5	45	-11.5	54	-20.5	72	-38.5
RC60	60%	30.9	36	-5.1	45	-14.1	54	-23.1	72	-41.1

*Tabelle 1 CO₂eq Bilanz in kg pro Tonne Pyrolysekohle - Asphalt mit verschiedenen Recyclinganteilen von 0 % - 60 % und Pyrolysekohle Dosierungen 2% - 4 %. "Cradle to gate"-Ansatz (ISO 14040)
In der Studie von Gruber und Hofko (2023) wurde ein durchschnittlicher Gehalt an mineralischen Feuchtaggregaten von 3% angenommen.¹⁶⁾ In der Studie von Mukherjee (2016) wurde eine Dichte von 2.4 Tonnen pro Kubik angenommen.¹⁹⁾*

Dosierung und Einbaumenge Pyrolysekohle-Asphalt

Die Dosierung und Menge der Pyrolysekohle im Asphalt hängen von den technischen Möglichkeiten der Zugabe im Asphalt-Mischwerk ab. Aktuell ist eine Zugabemenge von 2 - 4 M.-% Trockensubstanz geplant. In der Deckschicht wird keine Pyrolysekohle eingesetzt. Ein Entscheid über den allfälligen Einsatz in der Deckschicht kann erst getroffen werden, sobald weitere Erfahrungen und Pilotstrecken ausreichend ausgewertet sind.

RC-Asphalt/Ausbauasphalt

Recyclingasphalt hat insgesamt eine bessere Ökobilanz, da die Gewinnung der Ressourcen (insbesondere des Bitumens) einen grossen Einfluss darauf hat, wie stark die Umwelt durch Treibhausgasemissionen belastet wird.^{18,20)} Das wird deutlich anhand der Ökobilanzen von Asphalt mit verschiedenen Recyclingquoten (siehe Tabelle 1). Die Wirkungskategorie Treibhauseffekt ist bei einer Recyclingquote von 50 % im Mittel um ca. 20 kg CO₂eq/t Asphalt geringer als ohne Recycling.^{16,17,18,19)} Für die Berechnung des C-Senken Potentials im Kanton Basel-Stadt wird eine durchschnittliche Recyclingquote von 45 % zugrunde gelegt, um den unterschiedlichen Rahmenbedingungen (wie Kleinmengen und Spezialeinbauten) Rechnung zu tragen. Es wird konservativ angenommen, dass die durchschnittliche Recyclingquote für AC T und AC B maximal 60 % beträgt. Es besteht jedoch die Möglichkeit wie bei einer AC F, die Recyclingquote auf über 80 % zu erhöhen. Dies würde die CO₂eq-Bilanz von Asphalt weiter verbessern.

Kohlenstoffgehalt in Pyrolysekohle

Das C-Senken-Potential von Pyrolysekohle ergibt sich aus dem in der Pyrolysekohle gebundenen Kohlenstoff abzüglich der Treibhausgasemissionen, die zum Aufbau der C-Senke verursacht werden.¹⁰⁾ Im Einzelnen werden die Emissionen aus der Bereitstellung der Biomasse, die Emissionen aus der Lagerung der Biomasse und die Emissionen aus dem Pyrolyseprozess berücksichtigt. Die Daten für die Hochrechnung des Speicherpotentials von Pyrolysekohle basieren auf dem C-Senken-Zertifikat der IWB (ID des C-Senken-Zertifikat: cs-7gyc-tul4-bvek-2hfv).⁵⁾ IWB-Pyrolysekohle hat einen Kohlenstoffgehalt von 57,10 %, was einem CO₂eq-Gehalt von 2,1 Tonnen pro Tonne trockener Pyrolysekohle entspricht (Brutto-C-Senke). Abzüglich der CO₂eq aus Herstellung und Lagerung von 0.30 Tonnen ergibt sich ein Netto-C-Senken-Poten-

tial von 1.80 t CO_{2eq} pro Tonne Pyrolysekohle.⁵⁾ Es ist zu beachten, dass der Kohlenstoffgehalt von Pyrolysekohle je nach Ausgangsmaterial schwanken kann.²¹⁾ Der Gehalt an organischem Kohlenstoff schwankt je nach verwendetem Ausgangsstoff zwischen 35 und 90 % der Trockenmasse.

Analyse des effektiven C-Gehaltes im Mischgut und dessen Verteilung in der Mastix

Für eine künftige Mischgutanalyse und deren Beurteilung ist es hilfreich, die Zumischrate und die Verteilung der aus der Pyrolysekohle eingelagerten Kohlenstoff zu kennen. Entsprechende Prüfverfahren werden gerade entwickelt.

Pilotprojekte

Umschlagplatz habö AG

Als Pilotprojekt diente eine Versuchsfläche auf einem Umschlagplatz für Recyclingbaustoffe. Diese wurde im September 2022 durch die Tozzo AG auf einer Fläche von rund 450 m² eingebaut. Die Tragschicht wurde mit der Asphaltmischgutsorte AC T 22 H mit dem angestrebten Zielbindemittel B 50/70 und einem Recyclinganteil von 50 % eingebaut (Anhang 2: Mischgutergebnisse Versuchsfläche).



Abbildung 6 Belagseinbau Pyrolysekohle - Asphalt Versuchsfläche habö AG im September 2022

Das Mischgut wurde vom Belagswerk AMW Betriebs GmbH, Grenzach-Wyhlen hergestellt. Dem Asphalt wurden 2 % Pyrolysekohle, d. h. 20 kg pro Tonne, beigemischt. Auf einer 450 m² grossen Fläche wurde der Pyrolysekohle-Asphalt eingebaut (das entspricht 86 t Pyrolysekohle-Asphalt). Die Mischgutergebnisse sind im Anhang 2 detailliert dargestellt. Der Umschlagplatz für Recyclingbaustoffe erwies sich aufgrund der hohen Verkehrsbelastung als ideale Versuchsfläche. Es wurden ca. 3,1 t CO₂eq gebunden. Die Herstellung des Pyrolysekohle-Asphalts verursachte 2,9 t CO₂eq, so dass sich eine negative CO₂eq-Bilanz von -0,2 t CO₂eq ergibt (siehe Tabelle 2). Im Vergleich dazu beträgt die CO₂eq-Bilanz bei der Produktion von konventionellem Asphalt etwa 2,9 Tonnen.

Belagsschicht	MG-Sorte	Asphalt t	RC-An- teil %	Dosierung PK %	PK t	CO ₂ eq emittiert t	netto C- Senken Potential PK t	CO ₂ eq - Bi- lanz t	Verbesserung CO ₂ eq Bilanz (%)
Tragschicht	AC T 22 H	86	50	2%	1.7	2.9	3.1	-0.2	107%

Tabelle 2 CO₂eq - Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt Umschlagplatz habö AG. Bilanzierung nach Tonnen Pyrolyse-
kohle - Asphalt. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040

Belagsschicht	MG-Sorte	Asphalt t	RC-An- teil %	Dosierung PK %	PK t	CO ₂ eq emittiert t	netto C-Sen- ken Poten- tial PK t	CO ₂ eq - Bilanz t
Tragschicht	AC T 22 H	86	50	2.0%	1.7	2.9	3.1	-0.2
Tragschicht	AC T 22 H	86	50	0.0%	0.0	2.9	0.0	2.9

Tabelle 3 Vergleich der CO₂eq - Bilanz von Pyrolysekohle - Asphalt und konventionellem Asphalt für den Um-
schlagplatz habö AG. Die Bilanz wird in Tonnen ausgewiesen und folgt einem "cradle-to-gate"-Ansatz. ISO -
Norm 14040

Qualitativer Vergleich

Der Pyrolysekohle-Asphalt weist gute qualitative Eigenschaften und keine Schäden auf. Trotz erschwerter Einbaubedingungen sind die Prüfergebnisse gut.

Aufgrund der sehr schlechten Witterungsbedingungen (Starkregen) konnte eine eindeutige Aussage zum Schichtverbund bisher noch nicht getroffen werden konnte. Dies wird bei den folgenden Projekten genauer untersucht werden.

St. Alban-Vorstadt, Basel

In der St. Alban-Vorstadt wurde im August 2023 die erste Strasse im Kanton Basel-Stadt Pyrolysekohle-Asphalt eingebaut. Der Einbau der Tragschicht erfolgte mit dem Asphaltmischgut AC T 22 N mit dem angestrebten Zielbindemittel B 50/70 und einem Recyclinganteil von 50 % (Anhang 4: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, St. Alban-Vorstadt, Basel). Der Tragschicht wurden 2 % Pyrolysekohle, d.h. 20 kg pro Tonne beigemischt. Dadurch wurden ca. 1,2 t CO_{2eq} gebunden. Die Herstellung des Pyrolysekohle-Asphalts verursachte 1,1 t CO_{2eq}, so dass sich eine negative CO_{2eq} -Bilanz von -0,1 t CO_{2eq} ergibt (Tabelle 4).



Abbildung 7 Belagseinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der St. Alban Vorstadt, Kanton Basel - Stadt im August 2023

Belagsschicht	MG-Sorte	Asphalt t	RC-An- teil %	Dosierung PK %	PK t	CO _{2eq} emittiert t	netto C-Sen- ken Potential PK t	CO _{2eq} - Bi- lanz t	Verbesserung CO _{2eq} Bilanz (%)
Tragschicht	AC T 22 N	32	50	2%	0.6	1.1	1.2	-0.1	107%

Tabelle 4 CO_{2eq} - Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt St. Alban-Vorstadt. Bilanzierung nach Tonnen Pyrolysekohle-Asphalt. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040

Freiburgerstrasse, Basel

In der Freiburgerstrasse wurde 2023/2024 eine weitere Strasse im Kanton Basel-Stadt mit Pyrolysekohle-Asphalt ausgebaut (Anhang 5: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, Freiburgerstrasse, Basel). Der Tragschichteinbau erfolgte mit zwei verschiedenen Asphaltmischgütern AC T 16 N und AC T 32 H, wobei beiden Asphaltmischgütern 2,5 % Pyrolysekohle beige-mischt wurde. Somit wurden ca. 50 t Pyrolysekohle in die Tragschicht eingebaut. In der Fundationsschicht wurde ein AC F 22 mit ebenfalls 2,5 % Pyrolysekohle, also rund 5 t Pyrolysekohle eingebaut. In der Binderschicht wurde ein AC B 22 H mit ebenfalls 2,5 % Pyrolysekohle, d.h. ca. 24 t Pyrolysekohle eingebaut. Damit konnten ca. 138 t CO_{2eq} gebunden werden. Die Herstellung des Pyrolysekohle-Asphalts verursachte 102 t CO_{2eq}, so dass sich eine negative CO_{2eq} -Bilanz von -36 t CO_{2eq} ergibt (Tabelle 5).



Abbildung 8 Belagseinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der Freiburgerstrasse, Kanton Basel – Stadt 2023

Belagsschicht	MG-Sorte	Asphalt t	RC- Anteil %	Dosierung PK %	PK t	CO _{2eq} emittiert t	netto C- Senken Potenzial PK t	CO _{2eq} - Bi- lanz t	Verbesserung CO _{2eq} Bilanz (%)
Tragschicht	AC T 16 N	360	60	2.5%	9.0	11.1	16.2	-5.1	146%
Tragschicht	AC T 32 H	1570	50	2.5%	39.3	52.6	70.7	-18.1	134%
Fundationsschicht	AC F 22	180	70	2.5%	4.5	5.1	8.1	-3.0	159%
Binderschicht	AC B 22 H	950	45	2.5%	23.8	33.0	42.8	-9.8	130%
Gesamt		3060			77	102	138	-36	

Tabelle 5 CO_{2eq} Bilanz Grüner - Asphalt Freiburgerstrasse. Bilanzierung nach Tonnen Grüner Asphalt (Pyrolysekohle-Asphalt). Basierend auf einem "cradle to gate" Ansatz

Reservoirstrasse, Basel

Mit der Reservoirstrasse wurde 2023 eine weitere Strasse im Kanton Basel-Stadt mit Pyrolysekohle-Asphalt ausgebaut. Die Tragschicht wurde mit dem Asphaltmischgut AC T 22 S mit Zielbindemittel B 50/70 und 50 % Recyclinganteil eingebaut (Anhang 6: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, Reservoirstrasse, Basel). Der Tragschicht wurden 2,5 % Pyrolysekohle, d.h. 25 kg pro Tonne, beigemischt. Dadurch konnten ca. 20,3 t CO_2eq gebunden werden. Die Herstellung des Pyrolysekohle-Asphalts verursachte 15,1 t CO_2eq , so dass sich eine negative CO_2eq -Bilanz von -5,2 t CO_2eq ergibt (siehe Tabelle 6).



Abbildung 9 Belageinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der Reservoirstrasse, Basel Kanton Basel - Stadt 2023

Belagsschicht	MG-Sorte	Asphalt t	RC-Anteil %	Dosierung PK %	PK t	CO_2eq emittiert t	netto C-Senken Potenzial PK t	CO_2eq - Bilanz t	Verbesserung CO_2eq Bilanz (%)
Tragschicht	AC T 22 S	450	50	2.5%	11.3	15.1	20.3	-5.2	134%

Tabelle 6 CO_2eq Bilanz Grüner - Asphalt Reservoirstrasse, Basel. Bilanzierung nach Tonnen Grüner Asphalt (Pyrolysekohle-Asphalt). Basierend auf einem "cradle to gate" Ansatz

Anforderungen des Kanton-Basel Stadt

Für die Einbringung von Pyrolysekohle in Asphalt ist eine Reihe von Anforderungen zu erfüllen. Diese sind notwendig, um sicherzustellen, dass die Qualitätsstandards eingehalten werden und die vorgegebenen Richtlinien im Asphalt durch die Pyrolysekohle nicht unterlaufen werden. Der Einsatz dieser innovativen Technologie ist nur zulässig, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

European Biochar Certificate-Zertifizierung

Zur Qualitätssicherung muss die Pyrolysekohle daher nach dem European Biochar Certificate (EBC) geprüft werden. Einerseits muss die Pyrolysekohle zertifiziert sein, andererseits müssen die Händler*innen die Pyrolysekohle als Kohlenstoffschenke deklarieren. Bei der Zertifizierung der Pyrolysekohle selbst werden die Einhaltung der Qualitätsstandards und die Herkunft der Pyrolysekohle überprüft. Damit wird ein Standard für Nachhaltigkeit gesetzt. Es gibt verschiedene Kategorien der EBC-Zertifizierung. Für den Einsatz von Pyrolysekohle in Asphalt sind die Kategorien EBC-Urban, EBC-Gebrauchsmaterial und EBC-Rohstoff ausreichend.²²⁾ Diese Kategorien werden nach dem Analysepaket EBC-Basic untersucht und beinhalten eine Reihe von Parametern: Physikalische Parameter (z.B. Wassergehalt, Trockensubstanz), Thermogravimetrische Analyse (TGA), Nährstoffe (z.B. N, P, K), Schwermetalle (z.B. Pb, Cd, Ni) und organische Schadstoffe (z.B. 16 EPA PAK).²²⁾ Insbesondere die Einhaltung des «16 EPA PAK»-Standards ist wichtig, um die vorgegebenen Parameter im Strassenbau zu erreichen. Pyrolysekohle der Klassen EBC-Gebrauchsmaterial und EBC-Rohstoff darf mit einem Wassergehalt von weniger als 30 % in Verkehr gebracht werden, wenn entsprechende Sicherheitsvorkehrungen, insbesondere hinsichtlich Explosions- und Gesundheitsschutzes, getroffen werden.²²⁾ Die zulässige Biomasse für die Pyrolysekohle ist in der EBC-Positivliste definiert.²²⁾ An diese definierten Ausgangsstoffe ist sich strikt zu halten, diese dürfen einzeln oder gemischt genutzt werden. Ziel der Richtlinien ist es, eine wissenschaftlich fundierte, rechtlich abgesicherte, wirtschaftlich vertretbare und praktisch durchführbare Kontrolle der Herstellung und Qualität von Pyrolysekohle zu gewährleisten.

Ausgangsmaterialien der Pyrolysekohle

Zukünftiges Ziel ist die Herstellung von Pyrolysekohle aus industriellen Nebenprodukten wie Grünschnitt oder ähnlichen Abfällen. Die Verwendung von Nutzholz zur Herstellung von Pyrolysekohle sollte vermieden werden. Holz ist ein wertvoller Rohstoff und sollte vornehmlich als Baumaterial oder in der chemischen Industrie verwendet werden.^{23,24)} Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollten vor allem Reststoffe verwendet werden, die keine andere Verwendung finden.

Schadstoffuntersuchung auf PAK

Um die Einhaltung der geltenden Normen und Umweltstandards bei der Verwendung von Pyrolysekohle im Strassenbau zu gewährleisten, ist eine Schadstoffuntersuchung auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) unerlässlich. Die Untersuchung gewährleistet, dass der PAK-Gehalt der Pyrolysekohle den Grenzwerten für den Strassenbau entspricht und beim Recycling von Asphalt der Grenzwert von 250 mg/kg Asphalt gemäss der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA 814.600) vom 4. Dezember 2015 nicht überschritten wird.²⁵⁾ Dies ist auch in der Richtlinie Materialtechnologie des Kantons Basel-Stadt festgelegt.²⁶⁾

Vor der Verwendung im Strassenbau ist eine Schadstoffuntersuchung der Pyrolysekohle erforderlich. Die Pyrolysekohle kann für den Strassenbau zugelassen werden, wenn die Untersuchungsergebnisse den Anforderungen entsprechen und der PAK-Gehalt innerhalb der festgelegten Grenzwerte liegt.^{25,26)}

Die Einhaltung dieser Vorschriften und Normen ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Verwendung von Pyrolysekohle im Strassenbau umweltverträglich und gesundheitlich unbedenklich ist. Die Einhaltung dieser Standards minimiert potenzielle Risiken für die Umwelt und die öffentliche Gesundheit, während gleichzeitig die Vorteile der Pyrolysekohle als nachhaltiger Baustoff genutzt werden können.

Zulassung zum Kohlenstoffhandel

Die Richtlinien für die Zertifizierung von C-Senken werden ebenfalls von der EBC festgelegt.²⁷⁾ Für die Einbringung von Pyrolysekohle in Asphalt ist es unabdingbar, dass die Pyrolysekohle als C-Senke zertifiziert ist. Ansonsten ist eine Anrechnung als Negativemissionstechnologie nicht möglich. Die Zertifizierung stellt sicher, dass die Kohlenstoffspeicherung im terrestrischen System nachgewiesen werden kann. Für die Berechnung wird der Kohlenstoffgehalt bestimmt und von allen Treibhausgasemissionen der Produktionscharge abgezogen. Diese umfassen die Bereitstellung und Lagerung der Biomasse sowie die Emissionen, die während des Pyrolyseprozesses entstehen. Das EBC C-Senken Zertifikat bilanziert den gesamten CO₂-Fussabdruck der Pyrolysekohle. Dieser reicht von der Herkunft der Biomasse bis zum Verlassen der Anlage, in der die EBC-zertifizierte Pyrolysekohle hergestellt wird.²⁷⁾ Das C-Senken-Potenzial gibt an, welcher Massenanteil einer bestimmten Menge Pyrolysekohle in eine langfristige CO₂-Senke umgewandelt werden kann.

Wassergehalt

Der Wassergehalt der derzeit verwendeten IWB-Pyrolysekohle beträgt etwa 20 - 30 %. Für industrielle Anwendungen kann der Wassergehalt deutlich reduziert werden. Die Dosierung erfolgt jedoch auf Basis der Trockenmasse, da das Wasser während des Mischprozesses im Asphaltmischwerk verdampft.

Pyrolysekohle als pyrogene C-Abscheidung und -speicherung

Pyrolysekohle wird als *pyrogene Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (PyCCS)* Strategie angesehen. Dabei geht es darum Kohlenstoff aus der Atmosphäre abzuscheiden und dauerhaft zu binden, um unvermeidbare Treibhausgas-Emissionen auszugleichen. Das bedeutet, dass diese Strategie dazu beitragen kann, CO_2eq -Emissionen aus der Atmosphäre zu entfernen und somit einen Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels zu leisten. PyCCS ist eine Ergänzung zum Vorsorgeprinzip und stellt primär keinen Ersatz für Vermeidung von CO_2eq dar²⁸⁾ Das bedeutet, dass durch den Einbau von Pyrolysekohle-Asphalt nicht vorrangig CO_2eq vermieden werden, sondern bereits emittiertes CO_2 der Atmosphäre entzogen wird. Er ergänzt klimapolitische Massnahmen, die auf die direkte Vermeidung von CO_2eq abzielen.

Pyrolysekohle sollte gezielt eingesetzt werden, um eine technische Verbesserung der Asphalt-Qualität zu erreichen. Diese Art der PyCCS ist für den Kanton attraktiv, da dadurch die Qualität der C-Senke gesichert werden kann.

Schlussfolgerung

Die Verwendung von Pyrolysekohle in Asphalt ist eine äusserst vielversprechende Technologie, die das Potential hat, den Strassenbau erheblich nachhaltiger zu gestalten. Durch den Einsatz von Pyrolysekohle wird der Asphalt nicht nur CO_2eq -neutral, sondern kann je nach Anwendung und Dosierung sogar zu einer C-Senke werden, die einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele des Kantons Basel-Stadt bis 2037 leisten kann.

Es ist zu beachten, dass die Massnahme des Einsatzes von Pyrolysekohle in Asphalt nicht unbegrenzt angewendet werden kann. Nach dem ersten Einbauzyklus von Pyrolysekohle-Asphalt verringert sich das CO_2eq -Speicherpotential. Dies liegt daran, dass nur eine begrenzte Menge an Pyrolysekohle im Asphalt eingesetzt werden kann, nach heutigem Stand der Forschung nicht mehr als 5 %. Bei den in Basel für Strassen üblichen technischen Lebensdauern ist davon auszugehen, dass der erste Einbauzyklus, d.h. bis das gesamte Netz einmal erneuert ist, rund 40 Jahre andauern wird.

Abschliessend ist für die erfolgreiche Etablierung von Pyrolysekohle-Asphalt die Gewährleistung der technischen Machbarkeit in den Lieferwerken und die kontinuierliche Erprobung der Einbau-Bedingungen vor Ort von entscheidender Bedeutung. Dabei spielen die Qualitätskontrolle beim Einbau, über die Verdichtungskontrolle bis hin zur qualitativen Auswertung der Prüfungen im Labor eine Entscheidende Rolle für den Erfolg des Projektes. Eine sorgfältige Planung, die Forschung und die Zusammenarbeit zwischen allen relevanten Akteuren sind entscheidend, um diese vielversprechende Technologie im Strassenbau erfolgreich umzusetzen und einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Nachhaltigkeit zu leisten.

Anhang

Anhang 1: Potential PK-Asphalt Kanton Basel-Stadt

Jahr	[Ma%] Ø PK-Asphalt Einbau Kanton Basel-Stadt	t Asphalt	RC-Anteil %	Dosierung PK %	t PK	t CO ₂ eq emittiert	t netto C-Senken Potenzial PK	t CO ₂ eq - Bilanz PK-Asphalt	t CO ₂ -Bilanz kumuliert
2023	5	1175	45	2.0%	23.5	40.8	42.3	-1.5	-1.5
2024	5	1175	45	2.0%	23.5	40.8	42.3	-1.5	-3.1
2025	5	1175	45	2.0%	23.5	40.8	42.3	-1.5	-4.6
2026	60	14100	45	2.5%	352.5	489.3	634.5	-145.2	-149.8
2027	60	14100	45	2.5%	352.5	489.3	634.5	-145.2	-295.0
2028	80	18800	45	2.5%	470.0	652.4	846.0	-193.6	-488.7
2029	80	18800	45	2.5%	470.0	652.4	846.0	-193.6	-682.3
2030	80	18800	45	2.5%	470.0	652.4	846.0	-193.6	-876.0
2031	80	18800	45	2.5%	470.0	652.4	846.0	-193.6	-1069.6
2032	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-1734.7
2033	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-2399.7
2034	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-3064.8
2035	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-3729.8
2036	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-4394.9
2037	100	23500	45	3.5%	822.5	815.5	1480.5	-665.1	-5059.9
		247925			7591	8603	13663	-5060	

Tabelle 7 CO₂eq Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt. Durchschnittliches Szenario für den Einbau von Pyrolysekohle - Asphalt im Kanton Basel – Stadt für die Jahre 2023 - 2037. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040. 45% RC -Anteil, 2 – 3.5 % Pyrolysekohle dosiert

Anhang 2: Mischguterergebnisse Versuchsfläche

		Sollwerte	Pyrolysekohle - Asphalt			Konventionelle Mischung		
			27.09.2022	27.09.2022	Mittelwert	27.09.2022	27.09.2022	Mittelwert
			Nr. 3	Nr. 4		Nr. 1	Nr. 2	
			B9159-3	B9159-4		B9159-1	B9159-2	
BM lös-lich	[M-%]	4.4	4.2	4.4	4.3	4.2	4.5	4.4
Siebdurchgang	[Masse-%]	0.063	6.9	6.8	6.9	6.9	7.4	7.2
		0.125	8.6	8.9	8.8	8.7	9.6	9.2
		0.25	11.3	12.0	11.7	11.8	13.1	12.5
		0.50	14.8	15.9	15.4	15.8	17.7	16.8
		1.00	18.8	20.5	19.7	20.5	23.0	21.8
		2.00	26.2	29.1	27.7	28.9	32.5	30.7
		4.00	39.3	43.2	41.3	42.3	47.9	45.1
		5.60	48.5	53.1	50.8	52.4	58.6	55.5
		8.00	58.5	63.6	61.1	62.3	68.3	65.3
		11.20	68.7	74.0	71.4	72.0	77.7	74.9
		16.00	78.6	85.1	81.9	80.4	86.8	83.6
		22.40	95.8	96.0	95.9	100.0	98.8	99.4
		31.50	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00	100.0
Raum-dichte	[Mg/m³]	2.346	2.303	2.296	2.300	2.371	2.39	2.379
Roh-dichte	[Mg/m³]	2.492	2.462	2.452	2.457	2.501	2.49	2.495
Va	[Vol. %]	5.9	6.5	6.4	6.5	5.2	4	4.7
S	[kN]	11.3	12.4	12.9	12.7	11.1	12	11.8
F	[mm]	3.2	3.2	3.0	3.1	3.2	3.2	3.2
VFB	[%]	63.2	59.0	60.6	59.8	64.9	71.6	68.3
RuK	[°C]	48 ... 65	58	57	58	56	58	57
Pen	[1/10 mm]	30 ... 55	35	33	34	36	32	34
PI	[-]		-0.2	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5

Tabelle 8 Mischguterergebnisse Versuchsfläche habö AG AC T 22 H, B50/70, RC - Anteil 50%, 2 % Pyrolysekohle dosiert. Vergleich Pyrolysekohle - Asphalt und Konventioneller Asphalt. Sollwerte gemäss Erstprüfung AMW Grenzach – Wyhlen vom Mai 2020. Toleranzbereiche gemäss SN – EN – 13108 - 1, VSS - 40 430

Anhang 3: Mischgutergebnisse PK-Probemischungen

Merkmal / Kenngrösse	Pyrolysekohle - Asphalt					Anforderungen SN - EN- 13108 - 1 VSS - 40 430				
	AC T 22 N B70/100	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65	AC T 22 H B50/70	AC T 22 H PmB-E 25/55- 65	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65	AC T 22 N B70/100	AC T 22 S PmB-E 25/55-65	AC T 22 H B50/70	AC T 22 H PmB-E 25/55- 65	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65
Pyrolysekohle Dosierung [%]	2	3	4	4	4	-	-	-	-	-
Labornummer ViaTec Basel AG	B8656	B8938	B8692	B8751	B8852	-	-	-	-	-
Bindemittelgehalt [M.-%]	4.3	4.2	4.1	4.7	4.3	≥ 4.2	≥ 4.0	≥ 4.0	≥ 4.0	≥ 4.0
Hohlraumgehalt Va [Vol.-%]	5.5	4.8	6.4	5.8	4.6	3.0 – 6.0	4.0 – 7.0	4.0 – 7.0	4.0 – 7.0	4.0 – 7.0
Stabilität S [kN]	12.6	15.8	14.6	11.4	14.6	≥ 7.5	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen
VM – Füllungsgrad VFB [%]	64.1	66.2	58.7	64.2	67.5	≤ 80	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen
Fliesswert F mm	2.7	3.2	2.8	1.7	2.4	1.5 – 3.5	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen	Keine Anforderungen
Spurinnentiefe %	2.46 ¹⁾ 2.96 ²⁾	-	1.47 ¹⁾ 1.69 ²⁾	1.79 ²⁾	-	Keine Anforderungen	≤ 10.0	≤ 7.5	≤ 7.5	≤ 10.0

Merkmal / Kenngrösse		Pyrolysekohle - Asphalt					Anforderungen SN - EN- 13108 - 1 VSS - 40 430				
		AC T 22 N B70/100	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65	AC T 22 H B50/70	AC T 22 H PmB-E 25/55- 65	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65	AC T 22 N B70/100	AC T 22 S PmB-E 25/55-65	AC T 22 H B50/70	AC T 22 H PmB-E 25/55- 65	AC T 22 S PmB-E 25/55- 65
Ring und Kugel R.u.K [°C]		57.6	58.8	63.6	57.6	72.2	45 – 62	≥ 60	48 - 65	≥ 60	≥ 60
Penetration [1/10 mm]		34	33	30	32	31	40 – 75	15 – 50	30 - 55	15 – 50	15 – 50
Elast. Rückstellung [%]		-	54	-	31		-	≥ 50	-	≥ 50	≥ 50
BTSV	TBTSV [°C]	58.4	-	59.4	57.6	-	Keine Anforde- rungen	Keine Anforde- rungen	Keine An- forderun- gen	Keine Anforde- rungen	Keine Anforde- rungen
	δ BTSV [°]	78	-	70.3	78.4	-					
Wasserempfindlichkeit Verhältnis der indirekten Zugfestigkeit ITSR [%]		79	72	82	63	74	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70	≥ 70

Tabelle 9 Mischguterergebnisse Pyrolysekohle - Asphalt Mischungen 2 %, 3 % und 4 %. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN – EN – 13108 - 1 und VSS - 40 430)

Anhang 4: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, St. Alban-Vorstadt, Basel

Merkmal / Kenngrösse		Pyrolysekohle - Asphalt				Anforderungen SN - EN – 13108 - 1, VSS - 40 430
		AC T 22 N B50/70	AC T 22 N B50/70	AC T 22 N B50/70	AC T 22 N B50/70	AC T 22 N B50/70
Pyrolysekohle Dosierung [%]		2	2	2	2	-
Labornummer ViaTec Basel AG		B10013-1	B10013-2	B10013-3	B10013-4	-
Bindemittelgehalt [M.-%]		5.2	5.1	4.9	5.3	≥ 4.2
Hohlraumgehalt Va [Vol.-%]		3.4	3.0	3.9	4.0	3.0 – 6.0
Stabilität S [kN]		13.6	12.2	12.6	12.5	≥ 7.5
VM – Füllungsgrad VFB [%]		77.7	79.6	74.1	74.8	≤ 80
Fließwert F mm		2.9	3.1	2.8	2.7	1.5 – 3.5
Spurrinnentiefe %		in Bearbei- tung	in Bearbei- tung	in Bearbei- tung	in Bearbei- tung	Keine Anforderungen
Ring und Kugel R.u.K [°C]		60.4	58.4	-	-	48 – 65
Penetration [1/10 mm]		28	33	-	-	30 – 55
BTSV	TBTSV [°C]	60.7	58.1	-	-	-
	δ BTSV [°]	76.1	76.9	-	-	
PAK am Feststoff [mg/kg TS]		-	-	13.8	14.9	≤ 250 mg/kg BAFU
Wasserempfindlichkeit Ver- hältnis der indirekten Zugfes- tigkeit ITR [%]				74		≥ 70

Tabelle 10 Mischgutergebnisse Pyrolysekohle - Asphalt Einbau St. Alban Vorstadt MP 1767. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)

Anhang 5: Mischguterergebnisse PK-Asphalt, Freiburgerstrasse, Basel

AC F 22 – PK

Merkmal / Kenngrösse	Pyrolysekohle-Asphalt		Anforderungen SN - EN – 13108 - 1, VSS - 40 430
	AC F 22 B 50/70	AC F 22 B 50/70	AC F 22 B 50/70
Pyrolysekohle Dosierung [%]	2.5	2.5	-
Labornummer ViaTec Basel AG	B10295	B10297	-
Bindemittelgehalt [M.-%]	4.7	4	≥ 3.8
Hohlraumgehalt Va [Vol.-%]	6.6	7.2	3.0 ... 10.0
Stabilität S [kN]	14.5	14.2	≥ 5.0
VM – Füllungsgrad VFB [%]	61.1	55.3	≥ 80
Fließwert F mm	2.9	3	1.5 ... 3.5
Spurinnentiefe %	-	-	Keine Anforderungen
Ring und Kugel R.u.K [°C]	62.6	62.2	48 ... 65
Penetration [1/10 mm]	23	26	30 ... 55
BTSV	TBTSV [°C]	-	Keine Anforderungen
	δ BTSV [°]	-	
PAK am Feststoff [mg/kg TS]	-	-	≤ 250 mg/kg BAFU
Wasserempfindlichkeit Verhältnis der indirekten Zugfestigkeit ITSr [%]	-	-	≥ 70

Tabelle 11 Mischguterergebnisse AC F 22 Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)

¹⁾ bei 10'000 Zyklen

²⁾ bei 30'000 Zyklen

AC T 32 H – PK

Merkmal / Kenngrösse		Pyrolysekohle - Asphalt						Anforderungen SN - EN – 13108 - 1, VSS - 40 430
		AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65	AC T 32 H PmB-E 25/55-65
Pyrolysekohle Dosierung [%]		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	-
Labornummer ViaTec Basel AG		B10364	B10365	B10367	B10369	B10369-1	B10294	-
Bindemittelgehalt [M.-%]		4.4	3.9	4.8	7	4.9	4.6	≥ 3.6
Hohlraumgehalt Va [Vol.-%]		7.3	7	5.4	3.5	-	6.1	4.0 ... 7.0
Stabilität S [kN]		16.1	17.1	16.3	17.8	-	16.2	Keine Anforderungen
VM – Füllungsgrad VFB [%]		57.1	55.6	66.7	81.7	-	62.7	Keine Anforderungen
Fließwert F mm		3.1	3.7	3.3	3.7	-	3.6	Keine Anforderungen
Spurinnentiefe %		-	-	-	-	-	-	≥ 7.5 ²⁾
Ring und Kugel R.u.K [°C]		75.6	-	79.4	-	-	76.2	≥ 60
Penetration [1/10 mm]		25	-	27	-	-	28	15 ... 50
Elast. Rückstellung [%]		37	-	52	-	-	42	≥ 50
BTSV	TBTSV [°C]	-	-	65.8	-	-	-	Keine Anforderungen
	δ BTSV [°]	-	-	63.6	-	-	-	
PAK am Feststoff [mg/kg TS]		5.2	-	13.6	-	-	-	≤ 250 mg/kg BAFU
Wasserempfindlichkeit Verhältnis der indirekten Zugfestigkeit ITSr [%]		-	-	-	-	-	-	≥ 70

Tabelle 12 Mischguterergebnisse AC T 32 H Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)

¹⁾ bei 10'000 Zyklen

²⁾ bei 30'000 Zyklen

AC B 22 H - PK

Merkmal / Kenngrösse		Pyrolysekohle - Asphalt					Anforderungen SN - EN – 13108 - 1, VSS - 40 430
		AC B 22 H PmB-E 25/55-65	AC B 22 H PmB-E 25/55-65	AC B 22 H PmB-E 25/55-65	AC B 22 H PmB-E 25/55-65	AC B 22 H PmB-E 25/55-65	AC B 22 H PmB-E 25/55-65
Pyrolysekohle Dosierung [%]		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	-
Labornummer ViaTec Basel AG		B10363	B10366	B10368	B10370	B10292	-
Bindemittelgehalt [M.-%]		4.5	5.1	4.7	3.7	5.2	≥ 4.0
Hohlraumgehalt Va [Vol.-%]		5.9	5.9	6.3	7.5	5.3	4.0 ... 7.0
Stabilität S [kN]		15.7	16.1	16.2	16.7	16.4	Keine Anforderungen
VM – Füllungsgrad VFB [%]		63.1	17.1	62.6	15.7	68.7	Keine Anforderungen
Fließwert F mm		3.2	2.9	3.6	3.5	3.8	Keine Anforderungen
Spurinnentiefe %		-	-	-	-	-	≤ 7.5 ²⁾
Ring und Kugel R.u.K [°C]		79.6	72.8	-	-	68.4	≥ 60
Penetration [1/10 mm]		21	22	-	-	26	15 ... 50
Elast. Rückstellung [%]		58	46	-	-	51	≥ 50
BTSV	TBTSV [°C]		67.3	-	-	-	Keine Anforderungen
	δ BTSV [°]		68.2	-	-	-	
PAK am Feststoff [mg/kg TS]		k.S.m.	k.S.m.				≤ 250 mg/kg BAFU
Wasserempfindlichkeit Verhältnis der indirekten Zugfestigkeit ITSr [%]		-	-	-	-	-	≥ 70

Tabelle 13 Mischguterergebnisse AC B 22 H Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)

¹⁾ bei 10'000 Zyklen

²⁾ bei 30'000 Zyklen

Anhang 6: Mischgutergebnisse PK-Asphalt, Reservoirstrasse, Basel

Merkmal / Kenngrösse		Pyrolysekohle - Asphalt				Anforderungen SN - EN – 13108 - 1, VSS - 40 430
		AC T 22 S B 50/70	A T 22 S B 50/70	AC T 22 S B 50/70	AC T 22 S B 50/70	AC T 22 S B 50/70
Pyrolysekohle Dosierung [%]		2.5	2.5	2.5	2.5	-
Labornummer ViaTec Basel AG		B10183	B10184	B10220	B10221	-
Bindemittelgehalt [M.-%]		5.6	5.1	5.0	4.9	≥ 4.0
Hohlraumgehalt Va [Vol.%]		3.9	5.7	5.3	5.7	4.0 ... 7.0
Stabilität S [kN]		10.9	11	14.3	13.6	Keine Anforderungen
VM – Füllungsgrad VFB [%]		76.1	66.2	67.8	65.6	Keine Anforderungen
Fließwert F mm		3	2.7	3.6	2.9	Keine Anforderungen
Spurinnentiefe %		-	-	-	-	≥ 10.0 ²⁾
Ring und Kugel R.u.K [°C]		-	56	-	61.8	48 ... 65
Penetration [1/10 mm]		-	43	-	28	30 ... 55
BTSV	TBTSV [°C]	-	-	-	-	Keine Anforderungen
	δ BTSV [°]	-	-	-	-	
PAK am Feststoff [mg/kg TS]		-	12.4	-	-	≤ 250 mg/kg BAFU
Wasserempfindlichkeit Verhältnis der indirekten Zugfestigkeit ITSr [%]		-	-	-	-	≥ 70

Tabelle 14 Mischgutergebnisse AC T 22 S Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Reservoirstrasse, Basell. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)

Anhang 7: Zusätzliche Untersuchungen KIT

Zusammenfassung der Performanceprüfungen

Aus dem Mischgut AC T 22 N, B 50/70, 2% PK der Baustelle St. Alban-Vorstadt wurden weitere Untersuchungen im Baustoffprüflabor der KIT Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Strassen- und Eisenbahnwesen) durchgeführt. Ziele der Untersuchungen waren insbesondere die Tieftemperatur-Eigenschaften von Asphalten mit PK unabhängig überprüfen zu lassen.

Abkühlversuch TP Asphalt-StB, Teil 46 A: **Kälteeigenschaften:** Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch Ausgabe 2022

Die Mittlere Bruchtemperatur (3 Prüfkörper) liegt bei -26.9°C . Gemäss Norm wurde ein Wert aus der Mittelwertbildung eliminiert. Die Mittlere Bruchspannung der drei Prüfkörper beträgt 4.037 N/mm^2 . Die Bruchtemperatur liegt in der Größenordnung des Durchschnitts der bisherigen Erfahrungswerte.

Die Anforderungen der deutschen RStO 01 sind in Tabelle 16 beschrieben.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Bezeichnung des Probekörpers:	P2	P3	P4	-
Raumdicke, Verfahren D [g/cm^3]:	2,312	2,316	2,317	2,315
Bruchtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]:*)	-19,5**)	-27,4	-26,4	-26,9
Bruchspannung [N/mm^2]:	4,026	4,248	3,838	4,037

Tabelle 15 Untersuchungsergebnisse Abkühlversuch

Frosteinwirkungszone nach RStO 01	Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten und Asphaltbinder	Asphalttragschichtmischgut
I	$T_{\text{Br}} \leq -15^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Br}} \leq -10^{\circ}\text{C}$
II	$T_{\text{Br}} \leq -20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Br}} \leq -15^{\circ}\text{C}$
III	$T_{\text{Br}} \leq -25^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{Br}} \leq -20^{\circ}\text{C}$

Tabelle 16 Orientierungswerte für die im Abkühlversuch ermittelte Bruchtemperatur in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen am Ort der Asphaltbefestigung gemäss RStO 01

Einaxialer Zugversuch TP Asphalt-StB, Teil 46 A: **Kälteeigenschaften:** Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch Ausgabe 2022

Beim Zugversuch liegt bisher keine Referenzwerte vor. Es gibt hierfür aber Orientierungswerte (Tabelle 17). Die Ergebnisse für den geprüften ACT 22 N B 50/70 mit 2% Pyrolysekohle erfüllen mit einem Mittelwert von 4.363 Mpa die Orientierungswerte für Asphaltbeton und Splittmastixasphalt.

Asphaltart	Zugfestigkeit bei T = -10 °C	Bruchdehnung bei T = -10 °C
Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten (AC D)	$\beta_t(-10\text{ °C}) \geq 4,0\text{ MPa}$	$\varepsilon_F(-10\text{ °C}) \geq 0,4\text{ ‰}$
Splittmastixasphalt (SMA)		
Gussasphalt (MA)	$\beta_t(-10\text{ °C}) \geq 6,0\text{ MPa}$	
Offenporiger Asphalt (PA)	$\beta_t(-10\text{ °C}) \geq 1,4\text{ MPa}$	

Tabelle 17 Orientierungswerte für die in Zugversuchen ermittelte Zugfestigkeit und Bruchdehnung für verschiedene Asphaltmischgutarten

Spaltzug-Schwellversuch TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1: Einaxialer Druck-Schwellversuch – **Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme**, Ausgabe 2012

Der Druck-Schwellversuch wird normalerweise nicht an Tragschichtmaterial durchgeführt. Es lässt sich aber festhalten, dass die resultierende Dehnung sehr niedrig ausfällt und dadurch eine sehr kleine Dehnungsrate resultiert. Diese Größenordnung der Dehnungsrate wäre vergleichbar mit „guten“ splittreichen Asphaltbetonen oder stetig gestuften Bindern.

Die Ergebnisse der Prüfung sind in den Abbildungen 1 und 2 in Relation zu anderen Asphalten gesetzt. Beim Kalibrierasphalt handelt es sich um den Asphalt, der in der Richtlinie für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise“ (RDO Asphalt) der deutschen Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) verwendet wird.

Die Hauptkurve (Abb. 1) zeigt einen im Vergleich zu den Kalibrierasphalten höheren absoluten e-Modul. Der ACT 22 N nähert sich an den ACB an.

Die Ermüdungsfunktion des ACT 22 N mit PK ordnet sich bei den feinkörnigen Asphalten mit einem höher dosierten Normalbitumen ein.

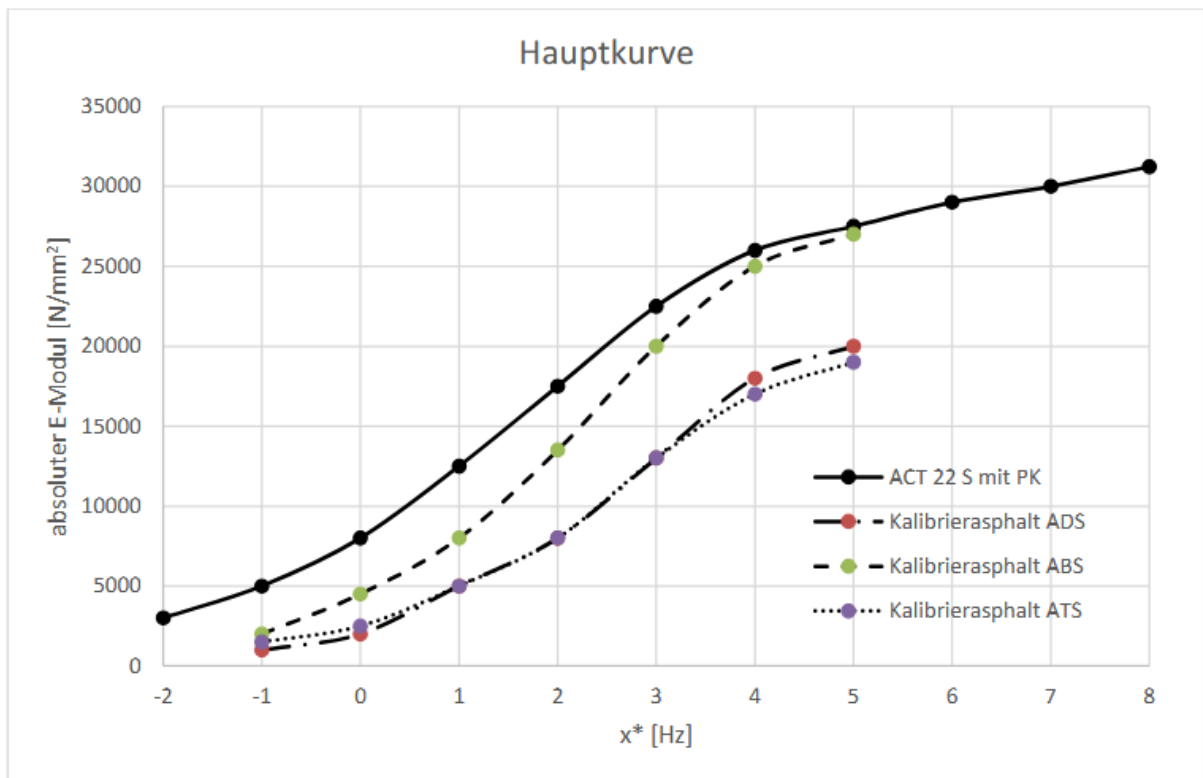


Abbildung 10 Hauptkurve Asphalt, nach Literatur 30)

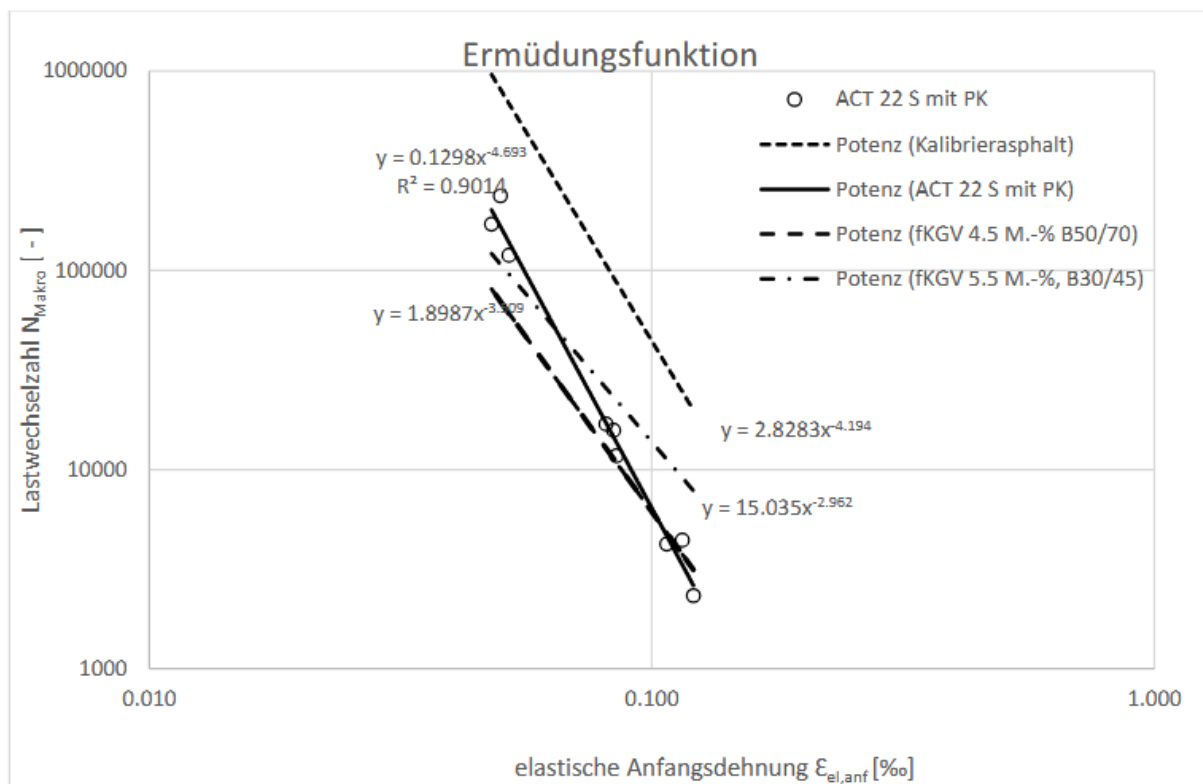


Abbildung 11 Ermüdungsfunktion nach Literatur 29), S52 und Literatur 30), Kalibrierasphalt

Zusammenfassung der Ergebnisse durch KIT und ViaTec Basel AG

Die Rezeptur des geprüften Materials entspricht dem bereits verwendeten AC T 22 N mit 2 M.-% PK. Dieses Mischgut hat die Anforderungen (Spurinnentest und Wasserempfindlichkeit) für H-Beläge erfüllt.

Die mit den angewandten Prüfungen ermittelten Werte lassen sich in den vorhandenen Bewertungshintergründe bzw. Erfahrungswerte des KIT, sowie weiterer Arbeiten anderer Forschungseinrichtungen einordnen. Die durchgeführten Prüfungen zeigen keine signifikanten Schwachpunkte für den AC T 22 N mit Normalbitumen B 50/70 und 2 M.-% Pyrolysekohle auf.

Literaturverzeichnis

- 1) Nitsch, H. Einsatz von Pyrolysekohle in der Landwirtschaft: Chancen und Herausforderungen; Institut für Ländliche Strukturforchung e.V. (IfLS) an der Goethe-Universität Frankfurt am Main: Frankfurt am Main, 2023. https://www.ifls.de/fileadmin/user_upload/Pyrolysekohle_Bericht_IfLS_Rentenbank.pdf.
- 2) Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Faktenblatt: Pyrolysekohle in der Schweizer Landwirtschaft - Risiken und Chancen für Boden und Klima; Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol, 2023; p 14. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/faktenblatt-Pyrolysekohle-2022.pdf.download.pdf/D_Faktenblatt_Pyrolysekohle.pdf.
- 3) Schmidt, H.-P.; Hagemann, N.; Abächerli, F.; Leifeld, J.; Bucheli, T. Pyrolysekohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngerezulassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken; Agroscope, 2021. <https://doi.org/10.34776/AS112G>.
- 4) UNFCCC. Information Note - Removal Activities under the Article 6.4 Mechanism Version 03.0; A6.4-SB004-AA-A04; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2023. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb004-aa-a04.pdf>.
- 5) European Biochar Certificate (EBC); q.inspecta. Carbon Sink Certificate – for CO₂eq Potential; Biochar Based Carbon Sinks; ID of C-sink certificate: cs-7gye-tul4-bvek-2hfv; Industrielle Werke Basel (IWB): Frick, Schweiz, 2022.
- 6) IWB. Pressebild IWB Pyrolyse Infografik - Bilddatenbank. WIB. <https://www.iwb.ch/ueber-uns/newsroom/bilddatenbank?search=infografik> (accessed 2023-09-05).
- 7) Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, Second Edition.; Lehmann, J., Joseph, S., Eds.; earthscan from Routledge: London New York, 2015.
- 8) Füssler, J.; Honegger, M.; Poralla, M.; Michaelowa, A.; Kessler, S. Negative Emissionen und Treibhausgas-Zertifikatehandel Potenziale, Kosten und mögliche Handlungsoptionen; Kanton Zürich / Stadt Zürich / Perspectives / INFRAS: Zürich, Schweiz, 2020; pp 1–88.
- 9) IWB. Pyrolysekohle als Klimaretterin und Multitalent im Garten. IWB - Industrielle Werke Basel. <https://www.iwb.ch/klimadreh/ratgeber/co2-einsparen/Pyrolysekohle#:~:text=Unsere%20IWB%20Pyrolysekohle%20stellen%20wir,beziehen%20k%C3%B6nnen%2C%20erfahren%20Sie%20hier.> (accessed 2023-08-29).
- 10) EBC. EBC (2012-2022) "European Biochar Certificate – Richtlinien Für Die Zertifizierung von Pyrolysekohle"; Version 10.2G; Ithaka Institute: Arbaz, Switzerland, 2022. <http://www.european-biochar.org>.
- 11) Zhou, X.; Moghaddam, T. B.; Chen, M.; Wu, S.; Adhikari, S. Biochar Removes Volatile Organic Compounds Generated from Asphalt. *Sci. Total Environ.* 2020, 745, 141096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141096>.
- 12) Ma, F.; Dai, J.; Fu, Z.; Li, C.; Wen, Y.; Jia, M.; Wang, Y.; Shi, K. Biochar for Asphalt Modification: A Case of High-Temperature Properties Improvement. *Sci. Total Environ.* 2022, 804, 150194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150194>.
- 13) Mousavi, M.; Aldagari, S.; Crocker, M. S.; Ackerman-Biegasiwicz, L. K. G.; Fini, E. H. Iron-Rich Biochar to Adsorb Volatile Organic Compounds Emitted from Asphalt-Surfaced Areas. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2023, 11 (7), 2885–2896. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06292>.
- 14) European Asphalt Pavement Association (EAPA). The Circular Economy of Asphalt EAPA Technical Review; Brussel Belgien, 2022; p 34. <https://eapa.org/the-circular-economy-of-asphalt-view/>.
- 15) Giani, M. I.; Dotelli, G.; Brandini, N.; Zampori, L. Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Using Reclaimed Asphalt, Warm Mix Technology and Cold in-Place Recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* 2015, 104, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>.
- 16) Gruber, M. R.; Hofko, B. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Recycled Asphalt Pavement Production. *Sustainability* 2023, 15 (5), 4629. <https://doi.org/10.3390/su15054629>.

- 17) Mantalovas, K.; Jiménez del Barco Carrión, A.; Blanc, J.; Chailleux, E.; Hornych, P.; Planche, J. P.; Porot, L.; Pouget, S.; Williams, C.; Presti, D. L. *Interpreting Life Cycle Assessment Results of Bio-Recycled Asphalt Pavements for More Informed Decision-Making. In Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020*; Harvey, J., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Flintsch, G., Eds.; CRC Press, 2020; pp 313–323. <https://doi.org/10.1201/9781003092278-33>.
- 18) Kytzia, S.; Pohl, T. *Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen*. 2021, 8.2021, 641–652.
- 19) Mukherjee, A. *Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration*, Michigan Technological University, Houghton, USA, 2016.
- 20) Pohl, T. *Ökobilanz Mischgut - Studie HSR*, 2019. <https://asphaltsuisse.ch/wp-content/uploads/2019/09/Oeko-bilanz-Mischgut.pdf> (accessed 2023-01-24).
- 21) *Engineered Biochar: Fundamentals, Preparation, Characterization and Applications*; Ramola, S., Mohan, D., Masek, O., Méndez, A., Tsubota, T., Eds.; Springer Nature Singapore: Singapore, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-2488-0>.
- 22) EBC. EBC (2012-2023) *“European Biochar Certificate – Richtlinien Für Die Zertifizierung von Pyrolysekohle”*; Version 10.3G; Ithaka Institute: Arbaz, Switzerland, 2023. <http://www.european-biochar.org/> (accessed 2024-04-26).
- 23) Frey, M.; Widner, D.; Segmehl, J. S.; Casdorff, K.; Keplinger, T.; Burgert, I. *Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering*. ACS Appl. Mater. Interfaces 2018, 10 (5), 5030–5037. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b18646>.
- 24) Song, J.; Chen, C.; Zhu, S.; Zhu, M.; Dai, J.; Ray, U.; Li, Y.; Kuang, Y.; Li, Y.; Quispe, N.; Yao, Y.; Gong, A.; Leiste, U. H.; Bruck, H. A.; Zhu, J. Y.; Vellore, A.; Li, H.; Minus, M. L.; Jia, Z.; Martini, A.; Li, T.; Hu, L. *Processing Bulk Natural Wood into a High-Performance Structural Material*. Nature 2018, 554 (7691), 224–228. <https://doi.org/10.1038/nature25476>.
- 25) Der Schweizerische Bundesrat. *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)*; 2015. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de> (accessed 2024-02-13).
- 26) Verwaltungen der Kanton Basel-Landschaft und Basel-Stadt. *Richtlinie «Materialtechnologie Im Tiefbau» Anforderungen Und Zulässige Chemische Belastung Bei Lieferung, Einbau Und Entsorgung an Materialien Im Tiefbau*; Version 2.0; 2021; p 23. <https://www.tiefbauamt.bs.ch/dam/jcr:027b37b6-cbd5-4d61-a59b-84ef8b17a6ff/Richtlinie%20Materialtechnologie%20im%20Tiefbau%202021%20V2.0%20unterschieden.pdf> (accessed 2023-08-17).
- 27) EBC. EBC (2020), *Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pyrolysekohle*; Version 2.1D; Ithaka Institute: Arbaz, Switzerland, 2021. https://www.european-biochar.org/media/doc/139/c-de_senken-potential_2-1.pdf (accessed 2024-04-26).
- 28) BAFU. *CO₂-Entnahme und -Speicherung*. Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/co2-entnahme-und-speicherung.html> (accessed 2023-08-08).
- 29) F. Wellner, I. Dragon; *Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf ihre primären Gebrauchseigenschaften*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011
- 30) A. Blasl; *Ein Beitrag zur Dimensionierung von Strassenkonstruktionen mit dünnen Asphaltdecken auf Trag-schichten ohne Bindemittel unter Berücksichtigung nichtlinearelastischer Materialeigenschaften*, Promotion, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Strassenbau, Professur für Strassenbau, TU Dresden, 2021
- 31) *Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise*, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 2009

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 CO ₂ eq Bilanz in kg pro Tonne Pyrolysekohle - Asphalt mit verschiedenen Recyclinganteilen von 0 % - 60 % und Pyrolysekohle Dosierungen 2% - 4 %. "Cradle to gate"-Ansatz (ISO 14040) In der Studie von Gruber und Hofko (2023) wurde ein durchschnittlicher Gehalt an mineralischen Feuchtaggregaten von 3% angenommen.16) In der Studie von Mukherjee (2016) wurde eine Dichte von 2.4 Tonnen pro Kubik angenommen.19)	17
Tabelle 2 CO ₂ eq - Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt Umschlagplatz habö AG. Bilanzierung nach Tonnen Pyrolysekohle - Asphalt. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040	20
Tabelle 3 Vergleich der CO ₂ eq - Bilanz von Pyrolysekohle - Asphalt und konventionellem Asphalt für den Umschlagplatz habö AG. Die Bilanz wird in Tonnen ausgewiesen und folgt einem "cradle-to-gate"-Ansatz. ISO - Norm 14040	20
Tabelle 4 CO ₂ eq - Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt St. Alban-Vorstadt. Bilanzierung nach Tonnen Pyrolysekohle-Asphalt. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040	21
Tabelle 5 CO ₂ eq Bilanz Grüner - Asphalt Freiburgerstrasse. Bilanzierung nach Tonnen Grüner Asphalt (Pyrolysekohle-Asphalt). Basierend auf einem "cradle to gate" Ansatz	22
Tabelle 6 CO ₂ eq Bilanz Grüner - Asphalt Reservoirstrasse, Basel. Bilanzierung nach Tonnen Grüner Asphalt (Pyrolysekohle-Asphalt). Basierend auf einem "cradle to gate" Ansatz	23
Tabelle 7 CO ₂ eq Bilanz Pyrolysekohle - Asphalt. Durchschnittliches Szenario für den Einbau von Pyrolysekohle - Asphalt im Kanton Basel – Stadt für die Jahre 2023 - 2037. Basierend auf einem "cradle-to-gate" Ansatz. ISO - Norm 14040. 45% RC -Anteil, 2 – 3.5 % Pyrolysekohle dosiert	28
Tabelle 8 Mischgutergebnisse Versuchsfläche habö AG AC T 22 H, B50/70, RC - Anteil 50%, 2 % Pyrolysekohle dosiert. Vergleich Pyrolysekohle - Asphalt und Konventioneller Asphalt. Sollwerte gemäss Erstprüfung AMW Grenzach – Wyhlen vom Mai 2020. Toleranzbereiche gemäss SN – EN – 13108 - 1, VSS - 40 430	29
Tabelle 9 Mischgutergebnisse Pyrolysekohle - Asphalt Mischungen 2 %, 3 % und 4 %. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN – EN – 13108 - 1 und VSS - 40 430)	31
Tabelle 10 Mischgutergebnisse Pyrolysekohle - Asphalt Einbau St. Alban Vorstadt MP 1767. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)	32
Tabelle 11 Mischgutergebnisse AC F 22 Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)	33
Tabelle 12 Mischgutergebnisse AC T 32 H Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)	34
Tabelle 13 Mischgutergebnisse AC B 22 H Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Freiburgerstrasse, Basel. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)	35

Tabelle 14 Mischgutergebnisse AC T 22 S Pyrolysekohle - Asphalt Einbau Reservoirstrasse, Basell. Sowie Anforderungen der in der Schweiz geltenden Normen (SN - EN - 13108 - 1 und VSS - 40 430)	36
Tabelle 15 Untersuchungsergebnisse Abkühlversuch	37
Tabelle 16 Orientierungswerte für die im Abkühlversuch ermittelte Bruchtemperatur in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen am Ort der Asphaltbefestigung gemäss RStO 01	37
Tabelle 17 Orientierungswerte für die in Zugversuchen ermittelte Zugfestigkeit und Bruchdehnung für verschiedene Asphaltmischgutarten	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Pyrolysekohle aus Grünschnittabfällen Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450) Aufnahmen	8
Abbildung 2 Zertifizierte IWB-Pyrolysekohle in Rohform	9
Abbildung 3 Rückgewonnener Füller aus Pyrolysekohle-Asphalt (3% dosiert)	10
Abbildung 4 Marshall Körper Pyrolysekohle-Asphalt (2% Dosierung) unter dem Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450). Vergrößerung 100µm (oben links), 20 µm (oben rechts), 300 µm (unten links und rechts)	14
Abbildung 5 Füller Pyrolysekohle-Asphalt (2% Dosierung) unter dem Rasterelektronenmikroskop (GeminiSEM 450). Vergrößerung 10µm. Grösse der einzelnen Teile 1.6µm - 17.9µm	15
Abbildung 6 Belagseinbau Pyrolysekohle - Asphalt Versuchsfläche habö AG im September 2022	19
Abbildung 7 Belagseinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der St. Alban Vorstadt, Kanton Basel - Stadt im August 2023	21
Abbildung 8 Belagseinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der Freiburgerstrasse, Kanton Basel – Stadt 2023	22
Abbildung 9 Belagseinbau Pyrolysekohle -Asphalt in der Reservoirstrasse, Basel Kanton Basel - Stadt 2023	23
Abbildung 10 Hauptkurve Asphalt, nach Literatur 30)	39
Abbildung 11 Ermüdungsfunktion nach Literatur 29), S52 und Literatur 30), Kalibrierasphalt	39