



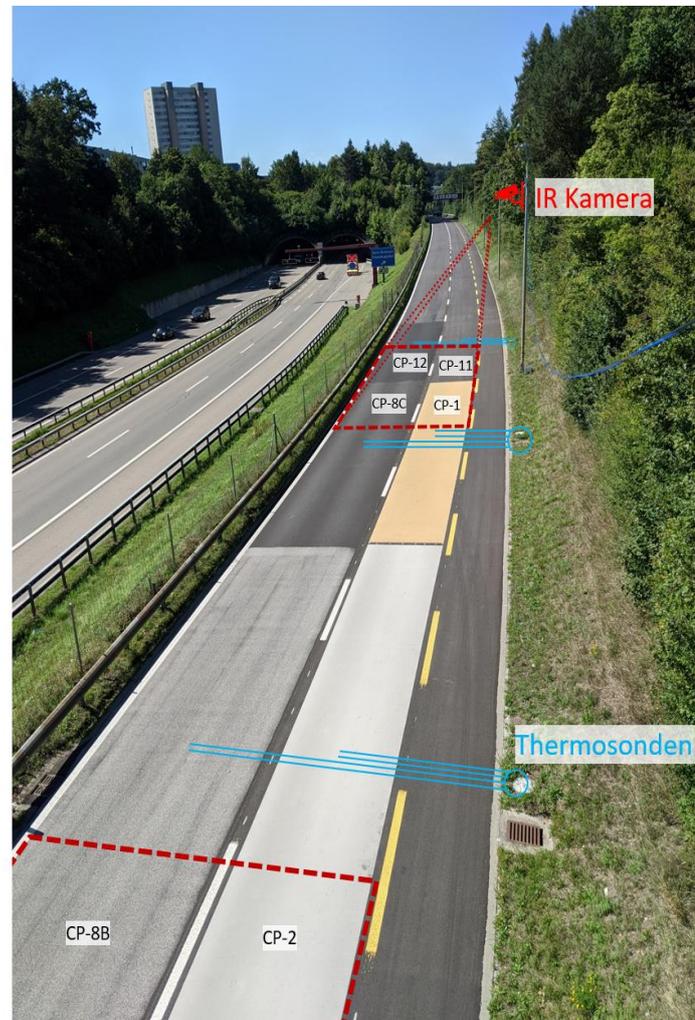
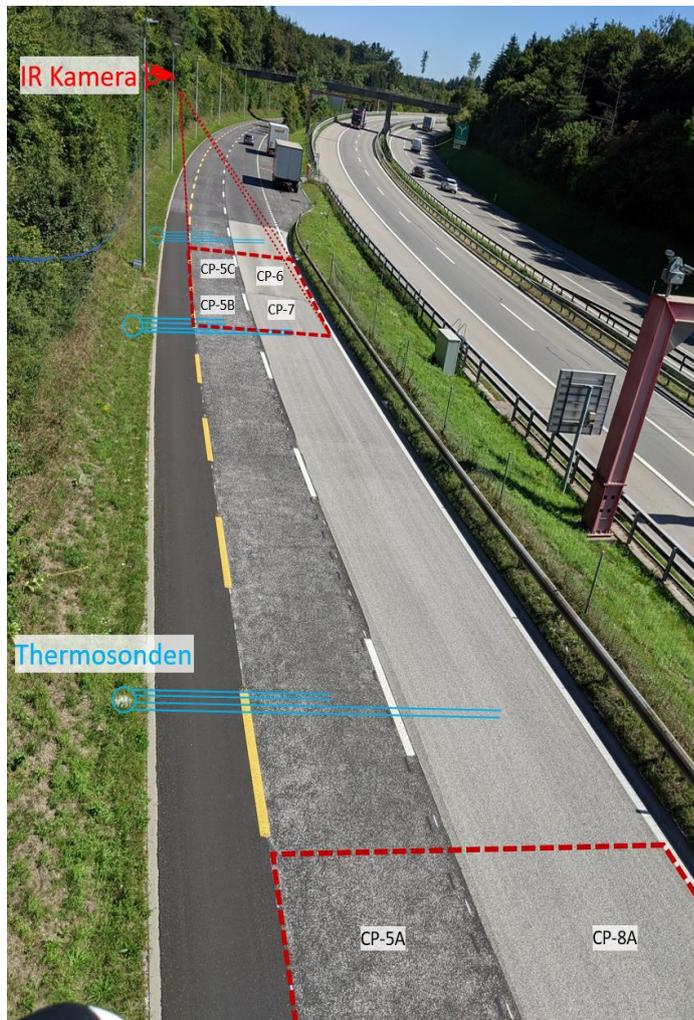
Bericht

Teststrecke kühle Beläge Neue Murtenstrasse, Bern

Klimamonitoring Sommer 2021 und 2022

Herausgabe: Bau- und Verkehrsdirektion / Tiefbauamt

23.11.2022



Impressum

Auftraggeber

Bau- und Verkehrsdirektion des Kantons Bern
Tiefbauamt
Oberingenieurskreis II

Auftragnehmer

Grolimund + Partner AG
Thunstrasse 101a
3006 Bern

Projektteam

Johannes Schindler
Daniel Schweizer
Erik Bühlmann

Tobias Balmer (Hans Weibel AG)

Zusammenfassung

Als Massnahme zur Anpassung an den Klimawandel testet der Kanton Bern im Rahmen dieses Pilotprojektes die Möglichkeit, mit sogenannten «kühlen Strassenbelägen» den städtischen Hitzeinseleffekt zu reduzieren. Für einen Praxistest verschiedener kühler Beläge besteht seit Sommer 2020 auf der Neuen Murtenstrasse in Bern eine Teststrecke mit zehn potenziell kühlen Strassenbelagsabschnitten und zwei Standardabschnitten in gewöhnlicher Bauweise. Begleitet wird das Pilotprojekt mit einem mehrjährigen, umfangreichen Monitoringkonzept, welches die Temperaturwirkung, Akustik (Strassenlärm) und Beständigkeit der Testbeläge mitverfolgt.

Auf der Teststrecke werden einerseits sieben konventionelle, dichte Beläge (Typ SMA 11, AC 11 und AC 8) und andererseits fünf lärmarme, offenporige Beläge (Typ SDA 4-16 und SDA 8-12) mit jeweils unterschiedlichen Aufhellungstechnologien untersucht: bei den SDA Belägen wurde die Kornfraktion im Mischgut mit hellem Gestein ersetzt, zusätzlich wurde bei gewissen Belägen die Oberfläche abgeschliffen oder wassergestrahlt. Die SMA Beläge wurden durch Abstreuerung mit hellem Splitt verschiedener Menge und Korngrösse aufgehellt. Bei den AC Belägen wurden zwei Beläge mit heller Farbe angestrichen und bei einem Belag wurde das Mischgut durch farbloses Bitumen und weissen Pigmenten modifiziert.

Die Messungen umfassen Innentemperaturen, Oberflächentemperaturen, Belagsakustik, Belagsalbedo und eine visuelle Zustandserfassung. Dank umfangreicher Datenaufbereitung und detaillierter Datenanalyse konnten die Bewertungsparameter hinsichtlich der Temperaturwirkung weiterentwickelt und fehlerhafte Messungen ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der Messungen in den Sommer 2021 und 2022 erlauben neben Aussagen zum momentanen Zustand auch eine Abschätzung zur Beständigkeit der Testbeläge und ihren Eigenschaften. Generell zeigen die SMA 8 Beläge mit Abstreuerung einen unerwünschten Verlust von Abstreusplitt mit daraus folgender verschwindender Temperaturwirkung, reduzierter akustischer Belagsgüte und deutlich abgenutztem baulichen Zustand. Das Verfahren des Kornersatzes mit hellem Gestein bei den SDA Belägen erweist sich hingegen auch mehr als zwei Jahre nach Belagseinbau als gut wirksame und beständige Technologie. Wird diese Oberfläche zusätzlich wassergestrahlt, ergibt sich nach zwei Jahren eine mittlere Temperaturwirkung von -4.9 und -4.4 K für den SDA 4 Belag beziehungsweise den SDA 8 Belag im Vergleich zum wärmsten gemessenen Standardbelag. Diese Wirkungen wurden für die Nachmittagshitze zwischen 12 und 16 Uhr während einer Hitzeperiode ermittelt. Die zwei Farbanstrich-Beläge weisen ebenfalls gute Temperaturwirkungen auf, jedoch reduzierte bautechnische Beständigkeit im Gegensatz zu den SDA Belägen. Sämtliche SDA Belagsabschnitte wie auch die zwei Farbanstrich-Beläge zeigen zudem auch sehr gute akustische Belagsgütewerte von -4.8 bis -6.7 dB und unterstreichen somit die mögliche Synergie von Lärm- und Temperaturminderung.

Inhalt

1. Ausgangslage.....	5
2. Messstandort und Beläge.....	6
3. Monitoringkonzept.....	11
3.1 Belagstemperaturen.....	11
3.2 Belagsalbedo.....	13
3.3 Belagsakustik.....	14
3.4 Visuelle Zustandserfassung.....	14
4. Ergebnisse.....	15
4.1 Meteorologische Situation.....	15
4.2 Visuelle Zustandserfassung.....	16
4.3 Belagstemperaturen.....	19
4.4 Belagsalbedo.....	23
4.5 Belagsakustik.....	24
5. Synthese.....	26
6. Ausblick.....	28
Anhang	
I CPX Messergebnisse.....	29
II Photos Belagsabschnitte.....	30

1. Ausgangslage

Mit voranschreitender Klimaveränderung nimmt auch die Hitzebelastung in den Städten und Agglomerationen in der Schweiz zu. Wetterextreme wie Hitzetage haben in der Schweiz seit Messbeginn sogar überdurchschnittlich zugenommen. In städtischen Gebieten wird die Sommerhitze durch den Hitzeinseleffekt verstärkt. Dies bedeutet, dass sich dicht bebaute Gebiete mit vielen versiegelten Flächen und eingeschränkter Luftzirkulation tagsüber stärker erwärmen und in der Nacht weniger abkühlen als die umliegenden ländlichen Gebiete. Für die Bevölkerung sind die hohen Temperaturen eine gesundheitliche Belastung, besonders auch aufgrund fehlender Erholung bei zu hohen Nachttemperaturen. Durch die Konzentration der Bevölkerung in den Städten und Agglomerationen, die Verdichtung des Stadtkörpers und durch die vermehrte Versiegelung der oberflächennahen Strukturen werden die Auswirkungen des Klimawandels somit noch verstärkt.

Als Massnahme zur Anpassung an den Klimawandel testet der Kanton Bern im Rahmen dieses Pilotprojektes die Möglichkeit mit sogenannten «kühlen Strassenbelägen» den Hitzeinseleffekt zu reduzieren. Diese Beläge heizen sich bei Sonnenschein weniger stark auf, da sie eine hellere Oberfläche aufweisen und somit einen grösseren Teil der Sonnenenergie reflektieren. Eine zusätzliche Wirkung können Beläge mit grossen Porenräumen aufweisen, die in der Nacht eine stärkere Abkühlung ermöglichen. Für einen Praxistest verschiedener kühler Beläge besteht seit Sommer 2020 auf der Neuen Murtenstrasse in Bern, Bethlehem eine Teststrecke mit zehn potenziell kühlen Strassenbelagsabschnitten und zwei Standardabschnitten in gewöhnlicher Bauweise. Begleitet wird das Pilotprojekt mit einem mehrjährigen, umfangreichen Monitoringkonzept, welches die Temperaturwirkung, Akustik (Strassenlärm) und Beständigkeit der Testbeläge mitverfolgt.

Die Erkenntnisse aus der ersten Messsaison 2020 wurden zusammen mit ähnlichen Messungen im Kanton Wallis im Rahmen des BAFU Forschungsprojektes *Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel: A.05 Kühle Strassenbeläge* publiziert. Die Ergebnisse der daran anschliessenden Sommer 2021 und 2022 werden in diesem Bericht gezeigt. Zwei Jahre nach Einbau der Beläge lassen sich zudem Abschätzungen bzgl. der Beständigkeit in Sicht auf die kühlende Wirkung, der Lärminderung und der Bautechnik treffen.

2. Messstandort und Beläge

Der Messstandort in Bern liegt auf der Neuen Murtenstrasse im Stadtteil Bethlehem (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2). Der Strassenabschnitt liegt zwischen dem Eichholz-Wald und der Autobahn A1 und weist einen durchschnittlich täglichen Verkehr von über 10'000 Fahrzeugen mit einem Schwerverkehrsanteil von rund 5 % auf (Quelle: Oberingenieurskreis II, Kt. Bern). Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Ein rund 120 Meter langer Abschnitt wurde dem Projekt zur Verfügung gestellt. Der Abschnitt hat eine Ausrichtung Nordost-Südwest und ist im gleichen Sektor frei von Hindernissen, die die Sonneneinstrahlung von morgens bis spätnachmittags abschirmen könnten. Der Schattenwurf des nordwest-seitig angrenzenden Waldes jeweils gegen Abend hat keinen gewichtigen Einfluss auf die Belagstemperaturen, wie durch die Temperaturmessungen bestätigt werden konnte. Aufgrund der Standortsituation inmitten von Waldgebiet unterscheidet sich das Mikroklima (Feuchte, reduzierte Wärmespeicher) von einer typischen Anwendungssituation im dicht bebauten Gebiet. Gleichwohl ist der Standort aufgrund der homogenen Bestrahlung und der intensiven Nutzung gut zur Untersuchung der Belageigenschaften, Beständigkeit und Reaktion auf Sonneneinstrahlung geeignet.

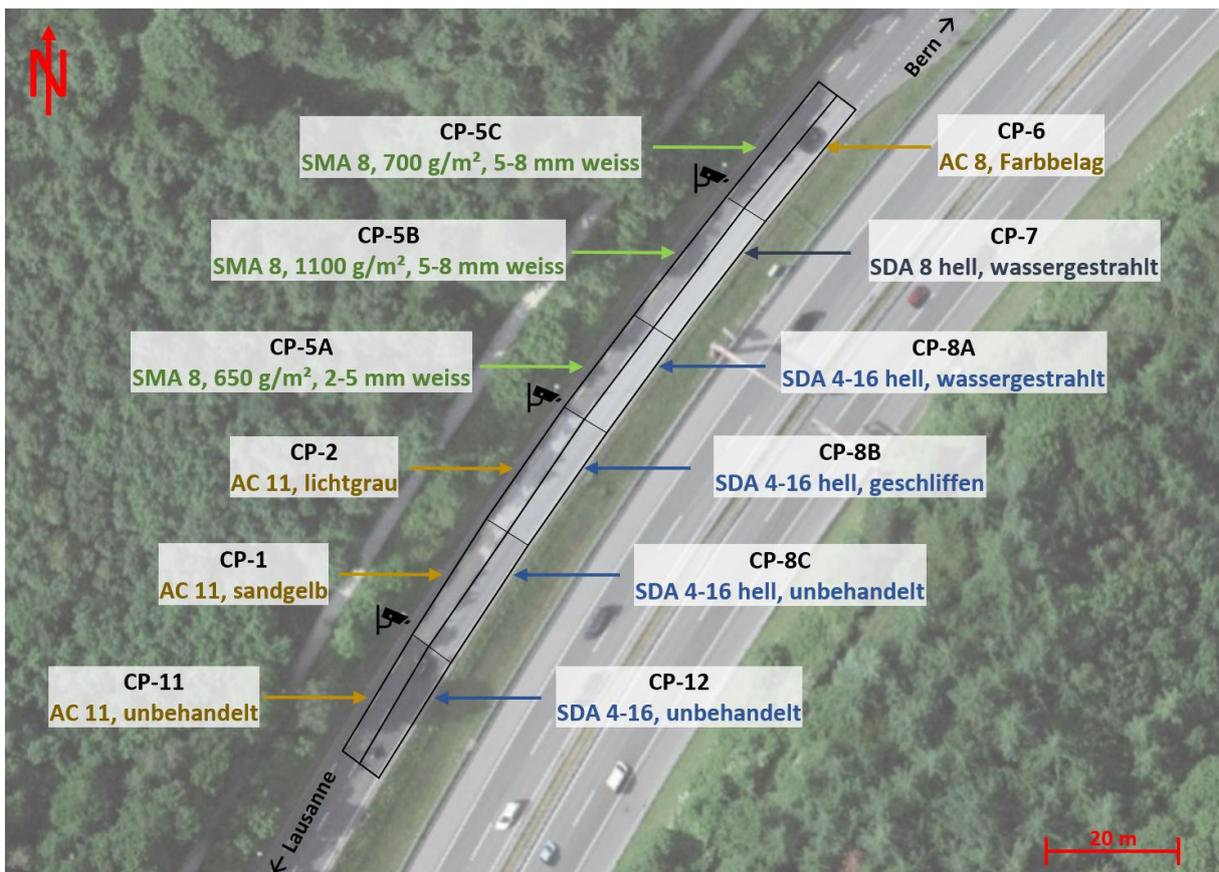


Abbildung 1: Luftbild der Neuen Murtenstrasse mit Kennzeichnung der zwölf Belagsabschnitte und der drei Kamerapositionen (Quelle: Swisstopo)

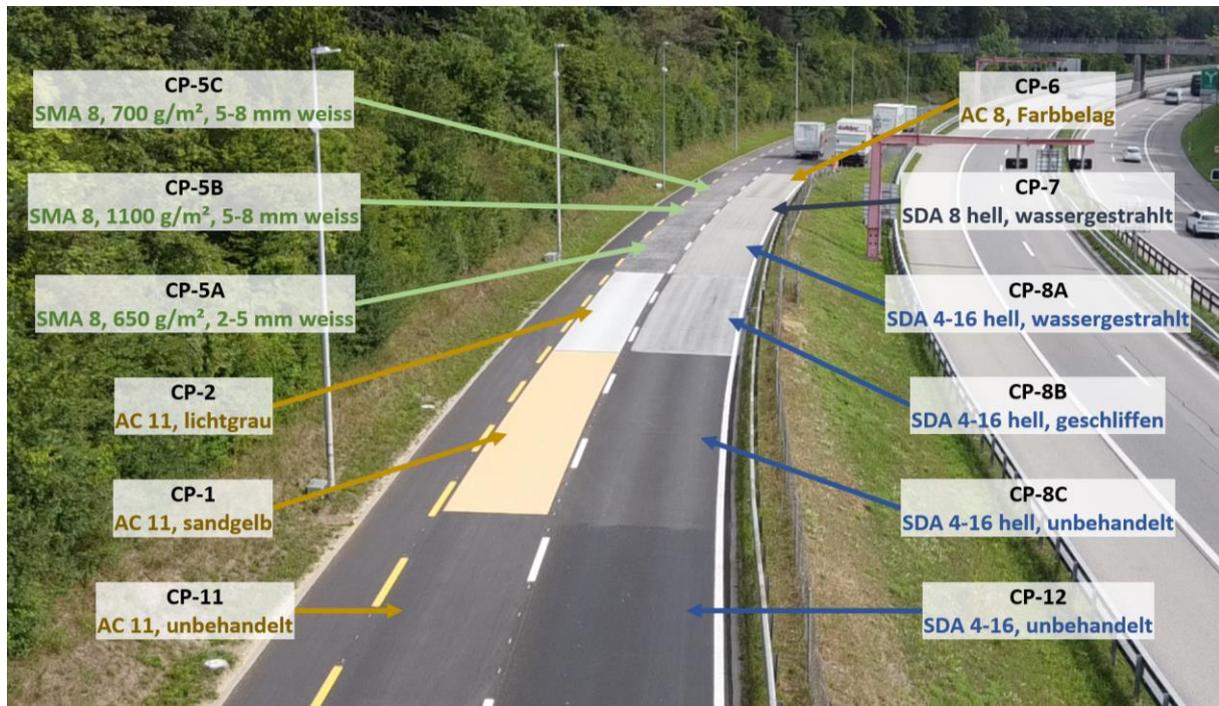


Abbildung 2: Ansicht aller zwölf Belagsabschnitte (Foto vom Juni 2020).

Auf der Teststrecke wurden einerseits sieben konventionelle, dichte Beläge (SMA 11, AC 11 und AC 8) und andererseits fünf lärmarme, offenporige Beläge (SDA 4-16 und SDA 8-12) eingebaut. Hierbei wurden die zwei Beläge CP-11 und CP-12 als Standardbeläge dichter und offenporiger Bauweise ohne aufhellende Belagstechnologie ausgeführt, währenddessen die restlichen zehn Beläge mit aufhellenden Technologien eingebaut wurden:

- Auf der südwestlichen Fahrspur (Fahrrichtung Lausanne) wurden drei konventionelle SMA 8 Beläge eingebaut (Segmente CP-5A bis CP-5C). SMA 8 steht für einen Splittmastixasphalt mit einem Grösstkorn von 8 mm. Dieser Belagstyp ist ein konventioneller Walzasphalt von dichter Bauweise und weist eine hohe mechanische Festigkeit auf.
- Ebenfalls auf der südwestlichen Fahrspur wurden weiter drei AC 11 S Beläge eingebaut (Segmente CP-2, CP-1 und CP-11). AC 11 S steht für einen Asphalt-Beton Belag mit dem Grösstkorn 11 mm und ist für sehr schwere Verkehrslasten geeignet. Auf der Gegenfahrbahn Richtung Bern ist des Weiteren ein AC 8 Belag eingebaut (Grösstkorn 8 mm).
- Auf der nordöstlichen Fahrspur (Fahrrichtung Bern) wurden fünf lärmarme, semi-dichte Beläge eingebaut (vier SDA 4 und ein SDA 8 Belag, siehe CP-7, CP-8A, CP-8B, CP-8C und CP-12). SDA 4-16 steht für seinen semidichten Asphalt mit einem Grösstkorn von 4 mm und einem Hohlraumgehalt von 16 %, SDA 8-12 für einen semidichten Asphalt mit einem Grösstkorn von 8 mm und einem Hohlraumgehalt von 12 %. Diese zwei Belagstypen weisen eine offenporige Oberfläche auf und zeichnen sich besonders durch ihre lärmindernde Wirkung aus (lärmarter Belag «LAB»). Durch die kleineren Körner weisen die SDA 4 Beläge in der Regel bessere akustische Eigenschaften als SDA 8 Beläge auf, dafür aber sind die SDA 8 Beläge vergleichsweise robuster und dadurch besser geeignet bei höheren Geschwindigkeiten.

Tabelle 1: Übersicht der zwölf eingebauten Belagstechnologien.

Poren	Bauart	Typ	Belagsabschnitt	Abstreuerung	Farbanstrich	Kornerersatz / Farbbelag (+ Oberflächenbehandlung)
dicht	Abstreuerung	SMA 8	CP-5c	700 g/m ² , 5-8 mm, weiss		
			CP-5B	1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss		
			CP-5A	650 g/m ² , 2-5 mm, weiss		
	Farbanstrich	AC 11	CP-2		RAL 7035 lichtgrau	
			CP-1		RAL 102 sandgelb	
	Standard		CP-11			
Farbbelag	AC 8	CP-6			farbloses Bitumen mit weissen Pigmenten	
offenporig	Kornerersatz	SDA 8-12	CP-7			helles Gestein (wassergestrahlt)
		SDA 4-16	CP-8A			helles Gestein (wassergestrahlt)
			CP-8B			helles Gestein (geschliffen)
			CP-8C			helles Gestein (unbehandelt)
			Standard	CP-12		

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die zwölf Belagsabschnitte und den dabei verwendeten Belagstechnologien. Pro Belagsgruppe (dicht vs. offenporig) wurde jeweils ein Abschnitt als Standardbelag in gewöhnlicher Bauweise belassen (CP-11 und CP-12). Die Beläge der verbleibenden zehn Abschnitte wurden durch Beimischung von hellem Gestein, hellen Farbpigmenten oder durch Auftragen heller Farben bzw. weissem Splitt modifiziert. Es wurden die folgenden aufhellenden Technologien verwendet:

- **Abstreuerung:** Bei allen drei SMA-Belagsabschnitten wurde weisser Splitt direkt nach der Deckschichtherstellung auf den bereits aufgetragenen SMA 8-Belag «abgestreut» und in den Belag eingewalzt (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Beim abgestreuten Splitt wurde jeweils die Korngrösse (2-5 mm und 5-8 mm) sowie die Abstreumenge (650-1100 g/m²) variiert.
- **Farbanstrich:** Bei den zwei AC 11 Belägen CP-1 und CP-2 wurden die Farben RAL 7035 (lichtgrau) respektive RAL 102 (sandgelb) als Beschichtung auf den fertigen Deckbelag aufgetragen.
- **Farbbelag:** Beim dem AC 8 Belag CP-6 handelt es sich um einen Farbbelag - hier wurde keine Farbe aufgetragen, sondern das Mischgut selbst modifiziert. Für diesen Belag wurde gewöhnliches Gestein, farbloses Bitumen und weisse Farbpigmente für das Mischgut verwendet.
- **Kornerersatz:** Bei den fünf SDA Belagsabschnitten wurden die herkömmlichen Gesteinskörner des Mischguts der Kornfraktion > 2 mm komplett durch hellen Gesteinskörner ersetzt. Zusätzlich wurde die Oberfläche bei den Abschnitten CP-7, CP-8A und CP-8B entweder abgeschliffen oder wassergestrahlt (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6 als Beispiel für das Abschleifen). Durch die Oberflächenbehandlung wurde die schwarze Bitumenummantelung der obersten Schicht abgetragen, wodurch die

Farbe des hellen Gesteins zu Vorschein tritt. Bei den unbehandelten Oberflächen kann die oberste Bitumenschicht hingegen erst teilweise mit der Zeit durch den Fahrzeugabrieb abgetragen werden.



Abbildung 3: Belagseinbau mit Abstreuen von hellem Splitt.



Abbildung 4: Nahaufnahme des eingewalzten hellen Splitts.



Abbildung 5: Abschleifen eines SDA 4 Belags mit einer Schleifmaschine.



Abbildung 6: Nach dem Abschleifen eines SDA 4 Belags (ungeschliffen vs. geschliffen).

In Tabelle 2 und Tabelle 3 ist eine Übersicht für die jeweiligen Modifikationen der Testbeläge zusammen mit Aufnahmen der Belagsoberflächen gezeigt. Anhang II dokumentiert zudem die zwölf Belagsabschnitte mit Übersichts- und Detailaufnahmen (Stand September 2021).

Tabelle 2: Übersicht der sechs Belagsabschnitte auf der Fahrbahn Richtung Lausanne.

Zeile 1: Abschnitt Nummer

Zeile 2: Belagstyp

Zeile 3 und 4: Aufhellungstechnologie Abstreuerung und Farbanstrich

Zeile 5: Foto Belagsoberfläche September 2021 (alle Bilder von Tobias Balmer, Weibel AG).

CP-5C	CP-5B	CP-5A	CP-2	CP-1	CP-11
SMA 8	SMA 8	SMA 8	AC 11	AC 11	AC 11
5-8 mm, weiss	5-8 mm, weiss	2-5 mm, weiss	lichtgrau	sandgelb	Standard
700 g/m ²	1100 g/m ²	650 g/m ²			
					

Tabelle 3: Übersicht der sechs Belagsabschnitte auf der Fahrbahn Richtung Bern.

Zeile 1: Abschnitt Nummer

Zeile 2: Belagstyp

Zeile 3 und 4: Aufhellungstechnologie Farbbeleg und Kornersatz

Zeile 5: Foto Belagsoberfläche September 2021 (alle Bilder von Tobias Balmer, Weibel AG).

CP-6	CP-7	CP-8A	CP-8B	CP-8C	CP-12
AC 8	SDA 8-12	SDA 4-16	SDA 4-16	SDA 4-16	SDA 4-16
farbloses Bitumen, weisse Pigmente	hell wassergestrahlt	hell wassergestrahlt	hell geschliffen	hell unbehandelt	Standard
					

3. Monitoringkonzept

3.1 Belagstemperaturen

Um die Wärmeentwicklung an der Oberfläche und innerhalb des Belags zu messen und aufzuzeichnen, wurden die Testabschnitte mit Infrarotkameras und Temperatursensoren ausgerüstet. Abbildung 7 zeigt die Sensorpositionen auf den Belagsabschnitten.

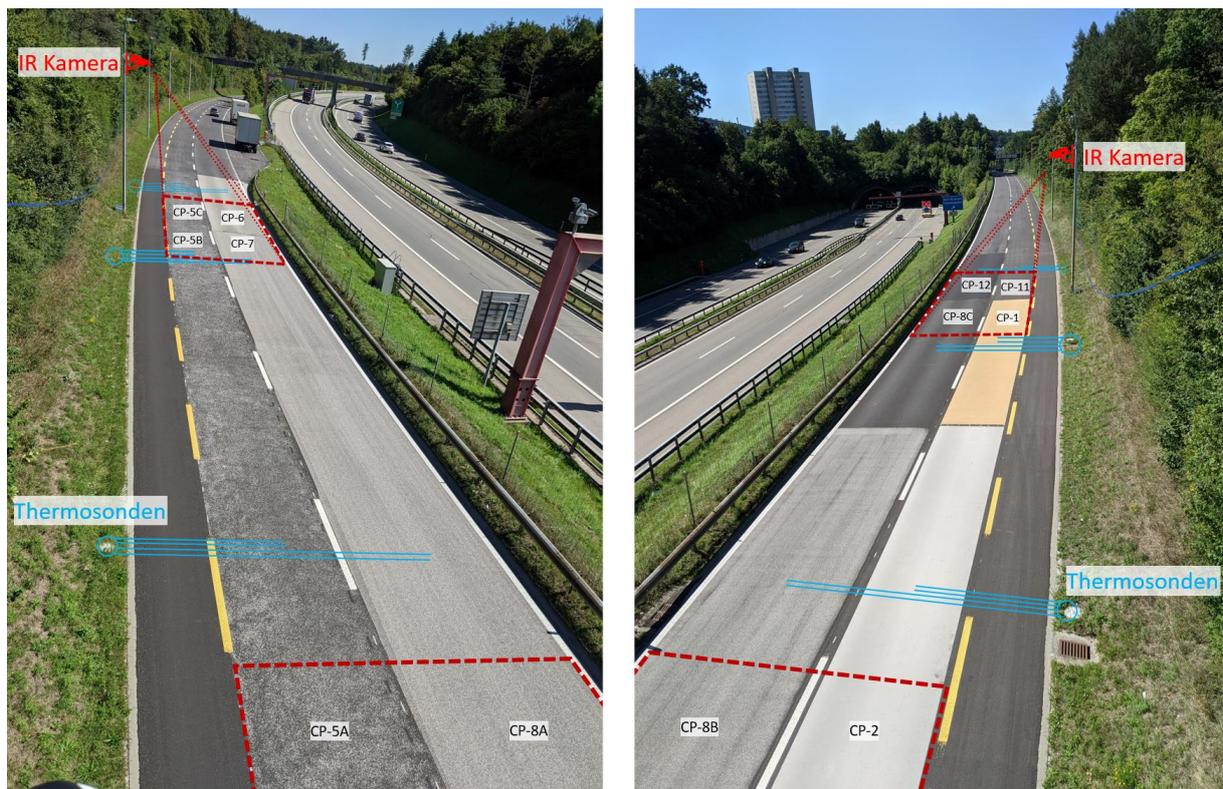


Abbildung 7: Messaufbau zum Monitoring der Oberflächen- und Innentemperaturen der Testbeläge. Der Schnittbereich, welcher durch die Infrarotkamera überwacht wird, ist gestrichelt dargestellt, die Thermosonden (je Belagsabschnitt zwei in verschiedenen Einbautiefen) als durchgezogene Linien mit dem Datenlogger im Kreis.

Oberflächentemperatur

Die eingesetzten Infrarotkameras *thermoIMAGER TIM 40* von Micro-Epsilon sind zur berührungslosen Messung von Oberflächentemperaturen von -20 °C bis 2450 °C konzipiert. Die Infrarotkameras sind an Lampenmasten montiert und auf die Schnittstelle von jeweils zwei oder vier Belagstypen ausgerichtet (vgl. Abbildung 8). In der Pixelmatrix der Aufzeichnung werden diejenigen Stellen definiert, welche mit Bestimmtheit einem Belagstyp zugeordnet werden können. Aus den Aufzeichnungen, die via Mess-PC und Modem übermittelt und zentral gespeichert werden, können anschliessend mittels Python-Skript zeitaufgelöst die gemittelten Temperaturdaten entnommen werden.

Nachfolgend wird die Oberflächentemperatur mit «T_IR» bezeichnet.

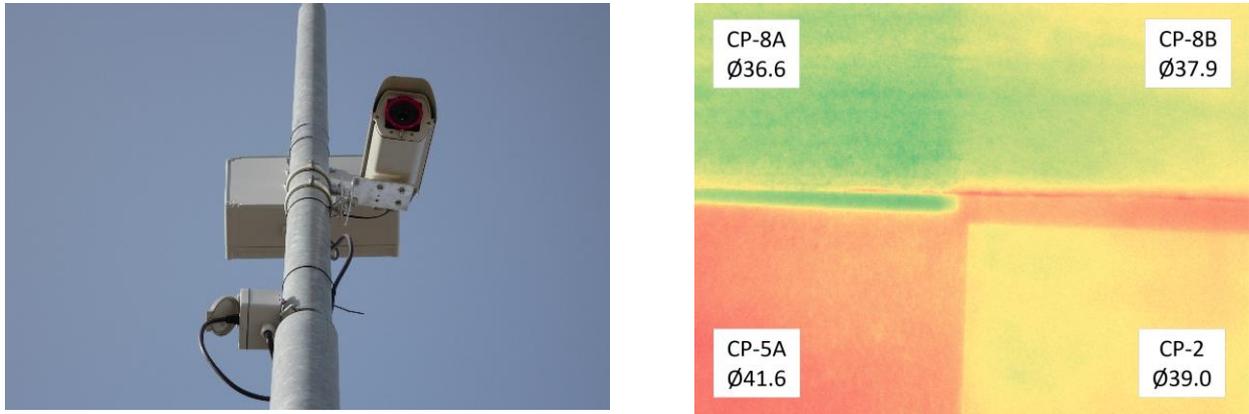


Abbildung 8: Montage Infrarotkamera mit Mess-PC und beispielhafte Infrarotbild-Aufnahme einer TIM 40 Kamera vom 21.08.2022 um 15 Uhr. (Die angegebenen Durchschnittstemperaturen entsprechen dem jeweiligen Mittelwert der gewählten Belagspixel zum genannten Zeitpunkt.)

Innentemperaturen

Zur Messung der Temperaturen innerhalb der Belagsabschnitte werden handelsübliche Thermoelemente des Typs K, welche mit einem Datenlogger des Typs *MSR145* von MSR Electronics GmbH ausgelesen werden, eingesetzt. Die Sensoren wurden beim Bau im Belag verlegt, dabei wurden deren Enden auf die Tragschicht gelegt bzw. um ca. 6 cm in Tragschicht versenkt und beide dann mit 4 cm Deckschicht überbaut (siehe Abbildung 7 und Abbildung 9).

Nachfolgend werden die Innentemperaturen mit «T_K4» (4 cm unter der Oberfläche) und «T_K10» (10 cm unter der Oberfläche) bezeichnet.



Abbildung 9: Thermoelement (links) und Einbau der Sonden in und auf die Tragschicht vor Einbau der Deckschicht (rechts)

Datenaufbereitung

Die aus der Pixelmatrix der Infrarotbilder gewonnenen Oberflächentemperaturen weisen eine Zeitauflösung von 1 min auf, enthalten jedoch Störsignale z. B. durch Fremdkörper im Bild. Diese wurden mittels geeigneter Filtereinstellungen aus den Temperaturverläufen entfernt (Ausreisser Analyse) und mittels gleitenden Mittelwertes homogenisiert.

Die Innentemperaturen stehen weitgehend störungsfrei mit einer Auflösung von 5 min zur Verfügung.

Die Daten aller Sensoren wurden zeitlich auf 5 min Werte aggregiert und einer abschliessenden Qualitätskontrolle unterzogen. Zudem wurden für weitere Auswertungen bzw. Filterung die Lufttemperatur (MeteoSchweiz Wetterstation Bern / Zollikofen) der Datenreihe hinzugefügt.

3.2 Belagsalbedo

Die Albedo ist einer der zentralen Messgrössen für die Charakterisierung von kühlen Belägen. Bei wolkenlosem Himmel und Windstille übersteigt im Sonnenschein die gefühlte Temperatur den Thermometerwert. Je dunkler die Oberfläche ist, umso deutlicher wird der Temperaturunterschied. Denn dunkle Flächen absorbieren die Sonnenstrahlung und wandeln diese in Wärme um, was wiederum zu Abstrahlung im Infrarotbereich führt (IR, Wellenlänge 780 nm bis 1 mm). Ein angestrahlter dunkler Körper erwärmt sich stärker als ein heller Körper, da ein heller Körper einen grossen Anteil der einfallenden Strahlung wieder reflektiert. Die Albedo errechnet sich als Quotient von reflektierter zu einfallender Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0.3 reflektiert 30 % der einfallenden Strahlung und absorbiert 70 %. Je heller eine Oberfläche ist, desto weniger Strahlung wird in Wärme umgewandelt¹. Den höchsten natürlichen Albedowert erreicht frisch gefallener Schnee mit 0.95. Trockener heller Sand am Strand strahlt entsprechend einer Albedo zwischen 0.30 bis 0.45 fast ein Drittel bis knapp die Hälfte der kurzwelligen Sonnenstrahlung zurück. Der etwas dunklere Sand von Wüsten liegt nur geringfügig unter diesen Werten mit ca. 0.25. Bei Grasflächen oder Waldgebieten werden immer noch bis zu 20 % der einfallenden Strahlung reflektiert. Die geringste Reflexion und somit die größten Absorptionswerte liegen bei Wasser (Albedo < 0.1) sowie in Städten (0.1 – 0.18). Hier absorbieren vor allem der schwarze Asphalt auf Straßen und Flachdächer sowie die zumeist dunklen Dachziegel die auftreffende Strahlung.



Abbildung 10: Albedometer zur Bestimmung der Belagsalbedo.

Im Messjahr 2020 wurde versucht, die Belagsalbedo mithilfe von RGB-Farbwerten und einer simplen Umrechnungsformel abzuschätzen. Ab dem Messjahr 2021 wurde die Belagsalbedo unter Verwendung eines Albedometers bestimmt. Das verwendete Albedometer wurde in der Glaziologie und Geomorphodynamik Gruppe der Universität Zürich entwickelt und konnte dankenswerterweise für die Messungen geliehen werden. Es besteht aus zwei entgegengerichteten Pyranometern (siehe Abbildung 10) - ein Pyranometer misst die einfallende Strahlungsstärke, durch Verwendung zweier Pyranometer kann die Albedo einer Oberfläche bestimmt werden.

¹ Hell und dunkel bezieht sich in diesem Kontext sowohl auf den sichtbaren Bereich als auch zusätzlich auf den infraroten Bereich der Sonnenstrahlung.

Die Albedo wurde für alle Belagsabschnitte jeweils im Querprofil des Fahrstreifens an drei Stellen (linke Reifenspur, Mitte, rechte Reifenspur) am 11. Oktober 2021 und am 11. August 2022 gemessen.

3.3 Belagsakustik

Da kühle Beläge mehrheitlich in urbanem Gebiet zur Anwendung kommen, stellt sich die Frage nach der akustischen Belagsgüte im Kontext des Lärmschutzes an der Quelle. Um die Güte der Beläge hinsichtlich des Lärms zu evaluieren, wurde auf die bewährte CPX Messmethode zurückgegriffen. Mit der CPX-Methode nach SN EN ISO 11819-2:2021 werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt. Bei diesem Verfahren wird der Schallpegel in zwei separaten schallgedämpften Kammern eines Anhängers in unmittelbarer Reifennähe mit je zwei Mikrofonen aufgezeichnet.



Abbildung 11: CPX Messfahrzeug mit Anhänger zur direkten Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche

Pro Reifen werden die A-bewerteten Schallpegel² kontinuierlich erfasst und pro 5 Meter Segmente gemittelt. Die Messfahrt erfolgt bei konstanter Geschwindigkeit. Die erfassten Daten werden anschliessend für Geschwindigkeit, Temperatur, Gummihärte und den Anhänger korrigiert und umgerechnet auf die Abweichung auf den in der Schweiz gültigen Emissionswert des Modells StL-86+.

Die CPX Messungen der Testbeläge wurden am 18.09.2020, 22.07.2021 und 21.09.2022 durchgeführt.

3.4 Visuelle Zustandserfassung

Zusätzlich zu den erhobenen Messdaten wurde eine visuelle Zustandserfassung durch die jährlich wiederholte Vorort-Begehung der Teststrecke von zwei Belagsexperten (T. Balmer (Weibel AG), E. Bühlmann (G+P AG)) durchgeführt. Hierbei wurde die Belagsoberfläche der Testbeläge mit Bildern dokumentiert, verglichen und diskutiert.

² Eine gebräuchliche Frequenzbewertung ist die A-Bewertung, wobei die Ergebnisse als dB(A) bezeichnet werden, was etwa der Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs entspricht.

4. Ergebnisse

4.1 Meteorologische Situation

Im Gegensatz zum Vorjahr 2020 mit schweizweit durchschnittlichen Temperaturen von 1 °C über der Norm 1981 – 2010, zeigte sich der Sommer 2021 nur mit Temperaturen im 30-jährigen Durchschnitt und vor allem besonders niederschlagsträchtigt. Im Vergleich mit vorherigen Jahren traten weniger Hitzetage und auch weniger Tropennächte auf³. Der Sommer 2022 ging hingegen als zweitwärmster Sommer seit Messbeginn 1864 mit frühen Hitzewellen und ausgeprägter Trockenheit in die Geschichte ein.

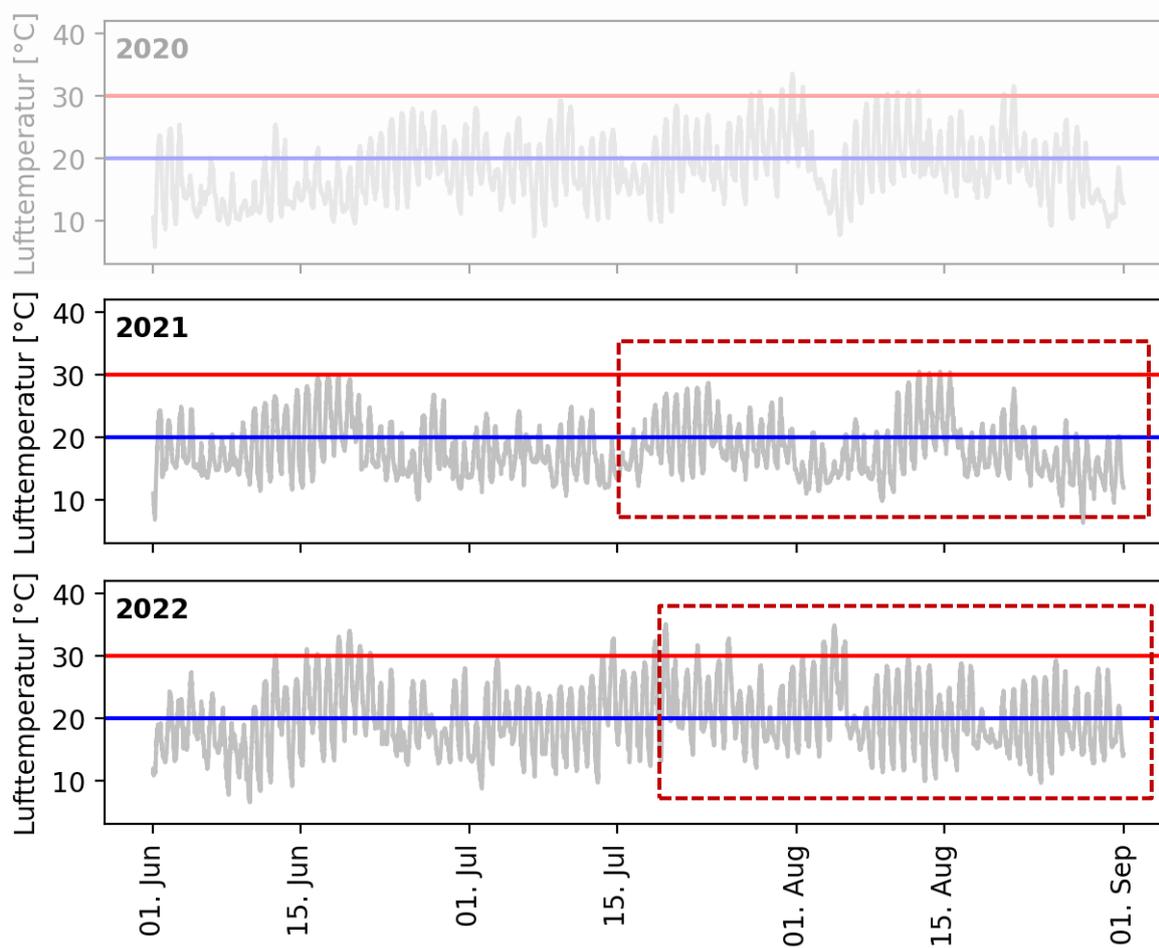


Abbildung 12: Lufttemperatur (2 m über dem Boden an der MeteoSchweiz Wetterstation Bern/Zollikofen) für die Monate Juni, Juli und August zum Vergleich der Sommertemperaturen für die Messjahre 2020 (oben), 2021 (mittig) und 2022 (unten). Rot umrandet ist der jeweilige Monitoring-Zeitraum dieser Studie.

Abbildung 12 zeigt die Lufttemperaturen an der MeteoSchweiz-Wetterstation in Bern/Zollikofen für die Sommermonate Juni bis September für alle drei Messjahre. Hitzetage zeichnen sich mit Tagesmaxima

³ Als Hitzetage gelten diejenigen Tage, an welchen die maximale Lufttemperatur, gemessen im Schatten und zwei Meter über Boden, die 30 °C Marke des Thermometers übersteigt. Als Tropennacht versteht man eine Nacht, in der die niedrigste Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt.

über der roten Linie aus, Tropennächte mit Tagesminima über der blauen Linie. Rot umrandet ist der jeweilige Untersuchungszeitraum dieses Monitoring Projektes.

Die Wirkung von kühlen Belägen hängt von der meteorologischen Situation ab – ein einfacher, direkter Vergleich der verschiedenen Messsaisons ist aufgrund der stark unterschiedlichen Rahmenbedingungen (z.B. dem einer betrachteten Hitzeperiode vorangegangenen Wettergeschehen) nur eingeschränkt möglich. Für die Auswertung der Belagstemperaturen (Kapitel 4.3) wurde je Messjahr eine Hitzeperiode mehrerer Tage mit optimaler Wirkung ausgewählt. Da der potenzielle Einsatz von kühlen Belägen darauf abzielt, Entlastung in Hitzeperioden zu schaffen, wurde dieses Vorgehen gewählt. Eine Queranalyse über verschiedene Stichproben (heisse Tage, warme Tage, verschiedene Hitzeperioden) zeigt jedoch eine im Rahmen der Messunsicherheit gute Wiederholbarkeit und Robustheit der Ergebnisse.

4.2 Visuelle Zustandserfassung

Bei den Begehungen der Teststrecken am 7. September 2021 und 30. September 2022 wurde der Zustand der einzelnen Beläge visuell untersucht. In diesem Kapitel werden die dabei gemachten Beobachtungen zusammengefasst. In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Begehungsergebnisse tabellarisch zusammengefasst und im Anhang II findet sich eine Sammlung von Übersichts- und Detailfotos aller Belagsabschnitte.

Die zwölf Testbeläge sind zwei Jahre nach dem Einbau allgemein immer noch in einem guten Zustand.

Tabelle 4: Zusammenfassung der visuellen Zustandserfassung der dichten Beläge vom 7. September 2021 und 30. September 2022.

Poren	Belagsabschnitt Technologie	Beobachtung 2021	Beobachtung 2022
dicht	CP-5C SMA 8, abgestreut mit 700 g/m ² , 5-8 mm, weiss	deutlicher Verlust des eingewalzten weissen Splitts mit Folgen für die Oberflächentextur	homogener Splittverlust, weniger Verlust als bei CP-5B, Aufhellung der Matrix
	CP-5B SMA 8, abgestreut mit 1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss	deutlicher Verlust des eingewalzten weissen Splitts mit Folgen für die Oberflächentextur	inhomogener Splittverlust, stärkster Splittverlust der drei SMA-Belägen, Aufhellung der Matrix
	CP-5A SMA 8, abgestreut mit 650 g/m ² , 2-5 mm, weiss	deutlicher Verlust des eingewalzten weissen Splitts mit Folgen für die Oberflächentextur	homogener Splittverlust, kein sichtbarer Unterschied Radspur vs. Zwischenspur, Aufhellung der Matrix
	CP-2 AC 11, Farbanstrich RAL 7035 lichtgrau	Flecken erkennbar, teilweise Schäden	Radspur erscheint dunkler, generell fleckig, wenig Veränderung zum Vorjahr
	CP-1 AC 11, Farbanstrich RAL 102 sandgelb	starke Abnutzung bzw. Alterung der Farbe, gleichmässig über den ganzen Abschnitt	keine mechanischen Schäden, kein Substanzverlust, Radspur leicht dunkler
	CP-11 AC 11 Referenz	keine Veränderungen erkennbar	deutlich heller als SDA-Referenz (CP-12), Radspur leicht dunkler, Oberfläche in sehr gutem Zustand
	CP-6 AC 8 Farbbelag, farbloses Bitumen mit weissen Pigmenten	ist in Radspur dunkler geworden, Angleichen an ältere "Standardbeläge"	Oberfläche in sehr gutem Zustand, gleichmässig hell im Vergleich zum Vorjahr

Tabelle 5: Zusammenfassung der visuellen Zustandserfassung der offenporigen Beläge vom 7. September 2021 und 30. September 2022.

Poren	Belagsabschnitt Technologie	Beobachtung 2021	Beobachtung 2022
offenporig	CP-7 SDA 8-12 Kornersatz mit hellem Gestein (wassergestrahlt)	keine Kornausbrüche erkennbar	keine Kornausbrüche, Helligkeit von CP-8A nicht zu unterscheiden, Längsstreifen der Oberflächenbehandlung nicht mehr sichtbar
	CP-8A SDA 4-16 Kornersatz mit hellem Gestein (wassergestrahlt)	keine Kornausbrüche erkennbar	keine Kornausbrüche, deutlich rauere Makrotextur, Längsstreifen der Oberflächenbehandlung nicht mehr sichtbar
	CP-8B SDA 4-16 Kornersatz mit hellem Gestein (geschliffen)	keine Kornausbrüche erkennbar, mehr schwarze Feinanteile ersichtlich als bei CP-8A (wassergestrahlt)	keine Kornausbrüche, erscheint heller als CP-8C und leicht dunkler als CP-8A, Längsstreifen der Oberflächenbehandlung nicht mehr sichtbar
	CP-8C SDA 4-16 Kornersatz mit hellem Gestein (unbehandelt)	keine Kornausbrüche erkennbar, Aufhellung der Radspuren	keine Kornausbrüche, homogene Helligkeit (Radspur vs. Zwischenspur), Poren erscheinen offen, keine Verschmutzung
	CP-12 SDA 4-16 Referenz	keine Kornausbrüche erkennbar, dunkler als Standardbelag CP-11	keine Kornausbrüche, Oberfläche deutlich dunkler als AC 11-Referenz, Lärminderung beim Übergang noch hörbar

SMA 8 Beläge

Die SMA 8 Beläge weisen als einzige Beläge Kornausbrüche auf. Die Kornausbrüche beschränken sich allerdings hauptsächlich auf den weissen, abgestreuten und eingewalzten Splitt. Insbesondere der Belag CP-5B mit der grössten Menge an abgestreuten, groben Splitt ist stark davon betroffen (siehe Abbildung 13). Durch den Splittverlust entstehen kleine Löcher/Vertiefungen, wodurch die sonst homogene, feine Oberflächentextur gestört wird. Eine solche Veränderung der Oberflächentextur hat Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Belags wie auch auf die Akustik. Der Verlust von grösseren Körnern (5 - 8 mm) hat hierbei einen grösseren negativen Einfluss auf die Akustik als der von kleineren Körnern (2 - 5 mm). Der Ausbruch und Abtrag von hellen Gesteinskörnern bedingt besonders auch einen Wirkungsverlust bzgl. der reduzierten Aufheizung der Beläge.



Abbildung 13: Links: Aufnahme der SMA 8 Beläge CP-5A (2-5 mm Abstreu) und CP-5B (5-8 mm Abstreu). Rechts: Nahaufnahme des CP-5B. Auf der linken Aufnahme sind die Kornausbrüche (Löcher) des gröbereren Abstreus deutlich sichtbar im Vergleich zu den feiner abgestreuten Körnern des CP-5A. Die einzelnen Kornausbrüche sind in der Nahaufnahme rot umrandet.

AC 11 Beläge

Der Standardbelag dichter Bauweise, CP-11, weist nach wie vor einen intakten Zustand ohne erkennbare Veränderungen auf. Dieser Belag wirkt zwei Jahre nach Belagseinbau deutlich heller als der Standardbelag semidichter Bauweise (SDA 4, CP12, siehe Abbildung 14). Die beiden AC 11 Beläge mit Farbanstrich zeigen hingegen deutliche Abnutzungs- und Alterungserscheinungen. Der lichtgraue Belag CP-2 weist teilweise Flecken und Schäden an der Belagsoberfläche auf. Der sandgelbe Belag CP-1 zeigt eine deutliche Abnutzung und Alterung der aufgetragenen Farbe nach einem Jahr Einsatz. Die Abnutzung bzw. Alterung fand gleichmässig über den gesamten Abschnitt statt. Diese Gleichmässigkeit lässt darauf schliessen, dass die beobachtete Veränderung hauptsächlich der Witterung (Sonnenstrahlung, Wasser, Wärme/Kälte) geschuldet ist.

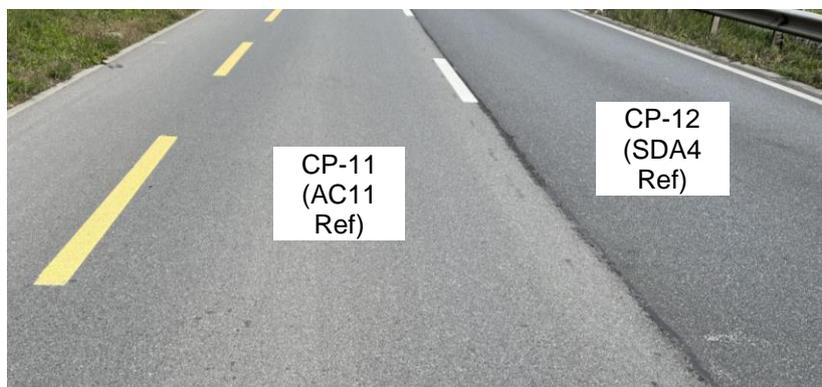


Abbildung 14: Vergleich der zwei Standardbeläge dichter und semidichter Bauweise im September 2022. Der AC 11 Belag ist deutlich heller als der SDA 4 Belag.

AC 8 Farbbelag

Der Farbbelag CP-6 ist generell in einem guten baulichen Zustand, zeigt aber ein interessantes Verhalten bezüglich seiner Farbe: in den Radspuren ist der Belag dunkler geworden und hat sich optisch an ältere Standardbeläge angeglichen (siehe Abbildung 15 links). Dies könnte einerseits mit einem Abschleifen der hellen Farbpigmente und dem Sichtbarwerden der etwas dunkleren Kornfraktion erklärt werden, aber auch andererseits durch das dunkler Färben der Oberfläche durch die schwarzen Pneus begründet werden.

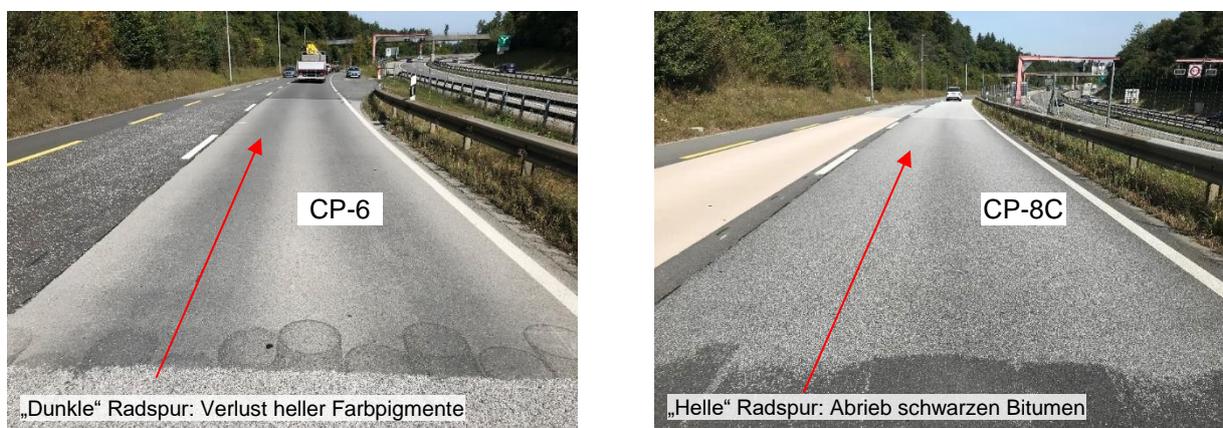


Abbildung 15: Aufnahme der Beläge CP-6 (AC 8, Farbbelag) und CP-8C (SDA 4-16, hell, unbehandelt) mit jeweils einem anderen Verhalten bezüglich des Aufhellens/Abdunkeln der Radspuren

SDA Beläge

Alle SDA Beläge zeigen eine gute bautechnische Beständigkeit – es sind keine Kornausbrüche erkennbar. Bei der geschliffenen Oberfläche CP-8B sind auch noch zwei Jahre nach Einbau mehr Feinanteile erkennbar als bei den wassergestrahlten Oberflächen CP-8A und CP-7. Der Standardbelag offenporiger Bauweise, CP-12, ist dunkler als der andere AC 11 Standardbelag dichter Bauweise.

Wie in Abbildung 15 zu erkennen, ist der Bereich der Radspuren beim Belag auf dem rechten Bild (SDA 4-16, Kornersatz und ohne Oberflächenbehandlung) heller als der Bereich zwischen den Radspuren. Durch die Räder der Fahrzeuge sowie durch die Witterung wurde die schwarze Bitumenumhüllung der obersten Gesteinskörner abgetragen, wodurch die hellen Gesteinsfarben freigelegt wurden. Dieser Effekt ist hauptsächlich bei den zwei SDA Belägen ohne Oberflächenbehandlung (CP-8C mit hellem Kornersatz und bedingt weit auch bei CP-12 ohne Kornersatz) zu erkennen. Bei den anderen SDA Belägen mit Oberflächenbehandlung wurde die oberste schwarze Bitumenummantelung der Gesteinskörner durch das Abschleifen oder Wasserstrahlen bereits abgetragen. Beim geschliffenen Belag (CP-8B) ist zudem erkennbar, dass mehr schwarze Feinanteile an der Oberfläche vorhanden sind als im Vergleich zu den zwei wassergestrahlten Belägen. Dieser Unterschied kann mit dem Unterschied zwischen den zwei Methoden begründet werden. Bei der Wasserstrahlmethode werden auch tieferliegende Bitumenummantelungen entfernt, während bei der Schleifmethode lediglich das Bitumen der abgeschliffenen Gesteinskörner abgetragen wird. Zwei Jahre nach Belagseinbau sind die Längsstreifen der Oberflächenbehandlung (CP-7, CP-8A und CP-8B) nicht mehr sichtbar.

4.3 Belagstemperaturen

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben wurden je Belagsabschnitt drei Temperaturen erfasst: die Oberflächentemperatur T_{IR} , die Innentemperatur in 4 cm Tiefe T_{K4} und die Innentemperatur in 10 cm Tiefe T_{K10} . Abbildung 16 zeigt den gemittelten Tagesgang dieser Temperaturen während der Hitzeperiode vom 19. bis 22. Juli 2021 exemplarisch für den AC 11 Belagsabschnitt CP-2. Die Charakteristika der einzelnen Messmethoden und Temperaturentwicklungen sind hier gut sichtbar:

- T_{IR} : Die Belagsoberfläche kann nachts stark abstrahlen (langwellige Energieabgabe) und erreicht damit tiefere Werte als die Lufttemperatur. Im Tagesverlauf steigt die Oberflächentemperatur sehr stark an und erreicht das Maximum am frühen Nachmittag, hier gut 42°C um kurz nach 15 Uhr, also 11 K über der maximalen Lufttemperatur.
- T_{K4} : 4 cm unter der Belagsoberfläche kann der Belag nachts nicht so stark abkühlen wie an der Oberfläche (Speichereffekt) und erhitzt sich mit leichter Verzögerung von rund einer Stunde bis auf ca. 1.5 K unter der maximalen Oberflächentemperatur.
- T_{K10} : das Signal verhält sich wie T_{K4} , nur mit noch stärkerer „Dämpfung“ und Verzögerung aufgrund der erhöhten Speichermasse.

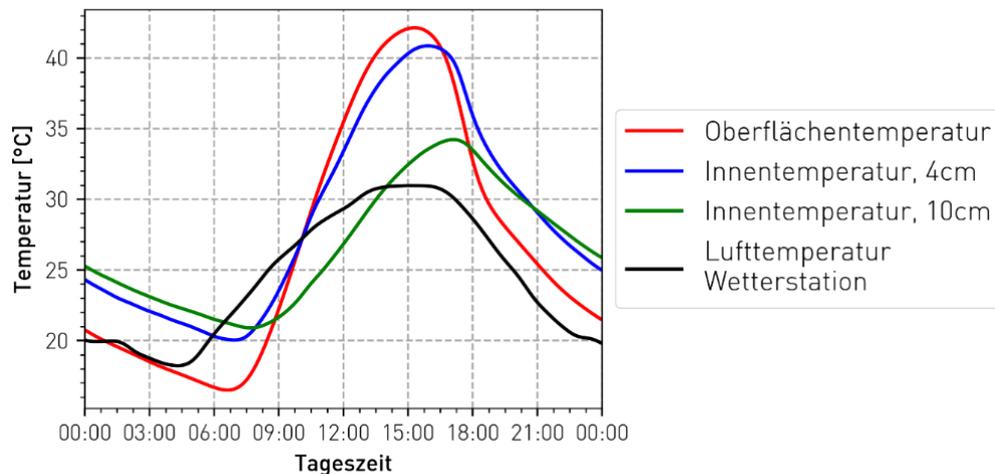


Abbildung 16: Gemittelte Temperaturwerte im Tagesgang für den Belagsabschnitt CP-2 für die Hitzeperiode vom 19. bis 22. Juli 2021. In schwarz ist die Lufttemperatur, rot die Oberflächentemperatur und in blau- bzw. grün die Innentemperaturen bei 4 bzw. 10 cm Tiefe dargestellt.

Innentemperaturen

Eine vertiefte Analyse der Innentemperaturen in 4 und 10 cm Tiefe zeigte, dass die Messunsicherheiten dieser Innentemperaturen zu gross für verlässliche Temperaturvergleiche zwischen den einzelnen Belagsabschnitten sind. In der Praxis muss bei der Einbautiefe der Temperatursensoren mit Unsicherheiten im Bereich von bis zu ± 1 cm gerechnet werden. Gleichzeitig liegen die vertikalen Temperaturgradienten im Belag bei bis zu 2 K/cm. Dies hat in der ungünstigsten Kombination systematische Offsets von bis zu 4 K zwischen zwei eingebauten Sensoren zur Folge. Daher werden diese Daten nicht für die folgenden Auswertungen eingesetzt.

Oberflächentemperaturen

Anhand der in beiden Jahren mit Infrarot-Kameras berührungslos erfassten Oberflächentemperaturen lassen sich die Temperaturwirkungen der Testbeläge gut beurteilen und verfolgen, wie in Tabelle 6 gezeigt. Die Referenz zur Berechnung der Temperaturwirkung ($\Delta T = T_{\text{Segment}} - T_{\text{Referenz}}$) wurde hierzu auf den Standardbelag dichter Bauweise AC 11 (CP-11) gesetzt. Zusätzlich zur in Kapitel 3.1 beschriebenen Datenaufbereitung wurden die Messdaten der einzelnen IR-Kameras aufeinander justiert⁴.

Als Auswerteparameter für die Temperaturwirkung während der gewählten Hitzeperiode wurden die Mittelwerte über die Tages- und Nachtzeiten 12 bis 16 Uhr und 22 bis 6 Uhr gewählt. In diesen Zeiträumen erwiesen sich die Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Testbelägen stabil und aussagekräftig. Die Standardabweichung der so ermittelten Temperaturdifferenzen liegt bei weniger als 0.4 K und damit unterhalb der geschätzten Temperatur-Messunsicherheit von ± 0.5 K.

⁴ Um bestmögliche Relativ-Vergleiche zwischen den Kameras zu gewährleisten, wurden die Infrarotmessdaten nachträglich wie folgt justiert: je Messjahr wurde eine geeignete Nacht nach Niederschlag (kein Strahlungs-Input, isotherm aufgrund des Regenwassers, zugleich Asphalt nur feucht und nicht nass (Emissivität)) im Anschluss an eine Kälteperiode (Speichereffekt vernachlässigbar) gewählt und hier die mittleren Temperaturen gleichgesetzt. Damit wurden fehlerhafte systematische Offsets zwischen den Kameras entfernt.

Tabelle 6: Die anhand der Belagsoberflächentemperaturen ermittelten Temperaturwirkungen während Hitzeperioden in den Sommer 2021 und 2022, bezogen auf den Referenzabschnitt CP-11. Mit ΔT wird die jeweilige mittlere Temperaturdifferenz „T_Segment – T_Referenz“ angegeben, dies für die Tages- bzw. Nachtstunden von 12 bis 16 Uhr („12-16“) bzw. 22 bis 6 Uhr („22-06“). Der Trend ('20 zu '21 und '21 zu '22) gibt eine qualitative Aussage zur Entwicklung der Temperaturwirkung von Jahr zu Jahr seit 2020.

Poren	Bauart	Typ	Belagsabschnitt	Technologie	ΔT [K] Ø (12-16)		ΔT [K] Ø (22-06)		Trend*	
					2021	2022	2021	2022	'20 zu '21	'21 zu '22
dicht	Abstreuerung	SMA 8	CP-5C	700 g/m ² , 5-8 mm, weiss	0.4	1.6	-0.3	1	↘	↘
			CP-5B	1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss	-0.1	1.1	-0.1	0.8	↘	↘
			CP-5A	650 g/m ² , 2-5 mm, weiss	0.1	-0.3	-0.4	-0.2	↘	→
	Farbanstrich	AC 11	CP-2	RAL 7035 lichtgrau	-3.3	-3.1	-1	-0.5	→	→
			CP-1	RAL 102 sandgelb	-4.7	-2.6	-1	0.0	→	↘
	Standard		CP-11	-	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref
	Farbbeleg	AC 8	CP-6	farbloses Bitumen, weisse Pigmente	-1.0	0.4	-0.8	0.3	→	↘
offenporig	Kornersatz	SDA 8-12	CP-7	helles Gestein (wassergestrahlt)	-6.1	-4.4	-2.6	-1.2	→	↘
			CP-8A	helles Gestein (wassergestrahlt)	-5.3	-4.9	-2.4	-1.8	→	→
		SDA 4-16	CP-8B	helles Gestein (geschliffen)	-3.6	-3.4	-1.9	0.0	→	→
			CP-8C	helles Gestein (unbehandelt)	-2.7	-2.8	-1.6	-1.3	↗	→
		Standard		CP-12	-	0.0	0.4	-1.2	-0.5	→

*keine Veränderung: → wurde kühler (verbesserte Wirkung): ↗ wurde wärmer (reduzierte Wirkung): ↘

Mit den Pfeilsymbolen in Tabelle 6 ist zudem der Trend der Wirkung im Vergleich zum Vorjahr 2020 bzw. 2021 angegeben. Ansteigende Pfeile zeigen eine Erhöhung der Temperaturdifferenz zur Referenz an (je kühler, desto stärker die Wirkung), abfallende Pfeile eine reduzierte Wirkung⁵.

Folgende Aussagen bzgl. der Temperaturwirkung und deren Entwicklung über zwei Jahre nach Einbau der Beläge hinweg können mit den in Tabelle 6 gezeigten Daten gemacht werden:

- Generell sind die Temperaturwirkungen tagsüber deutlich ausgeprägter als nachts und zeigen im Rahmen der erwarteten Entwicklung und Messgenauigkeit konsistente Ergebnisse.
- In praktisch allen Fällen nahm die kühlende Wirkung von 2021 auf das Jahr 2022 ab. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gewählte Referenz CP-11 gemeinsam mit den anderen Testabschnitten altert und somit ein «gleitender Bezugspunkt» besteht. Ein Effekt aufgrund des generellen Aufhellens der Matrix durch Abnutzung und Verwitterung kann somit nicht erfasst werden (im Gegensatz zu den Albedomessungen mit Absolut-Werten).

⁵ Abgesehen vom Trend '20 zu '21 wird kein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der BAFU-Pilotstudie mit Messungen aus dem Sommer 2020 vorgenommen. Aufgrund neuer Erkenntnisse in der Auswahl der Bewertungsgrössen, die hinsichtlich Robustheit und Aussagekraft optimiert und angepasst wurden, können die absoluten Temperaturwirkungen nicht direkt verglichen werden.

- Die kühlestes Temperaturen und somit die besten Wirkungen weisen die zwei wassergestrahnten SDA Beläge sowie der mit sandgelber Farbe angestrichene AC 11 Belag mit -6.1 K (CP-7), -5.3 K (CP-8A) und -4.7 K (CP-1) auf und wurden im ersten Jahr gemessen. Zwei Jahre nach Belageinbau weisen diesen drei Beläge eine Wirkung von -4.9 bis -2.6 °C (CP-1) auf.
- Die wärmsten Temperaturen und somit keine «kühlen» Temperaturwirkungen zeigt der Standardbelag SDA 4-16 (CP-12), der Farbbelag CP-6 und die drei abgestreuten SMA Beläge (CP-5A bis 5C).
- Die drei abgestreuten SMA Beläge zeigen alle drei keine Temperaturwirkung. Im Jahr 2022 weisen die zwei SMA Beläge CP-5C und CP-5B mit dem grösser abgestreuten Korndurchmesser (5-8 mm) höhere Temperaturen als der SMA Belag CP-5A mit kleiner abgestreutem Korndurchmesser (2-5 mm) auf. Die schlechte Temperaturwirkung dieser drei Beläge deckt sich mit der Beobachtung, dass diese Beläge einen substanziellen Verlust an weissem Splitt aufweisen und damit an Wirkung verloren haben.
- Die zwei Beläge CP-1 mit sandgelbem und CP-2 mit grauem Farbanstrich weisen beide gute Temperaturwirkungen von -2.6 und -3.1 °C auf. Es zeigt sich, dass sich die AC 11 Beläge dank der hellen Farbanstriche weniger stark erwärmen. Auffallend ist jedoch, dass von 2021 auf 2022 der sandgelbe Belag deutlich an Temperaturwirkung einbüsste.
- Bei den SDA Belägen weist der Standardbelag SDA 4-16 (CP-12) trotz der etwas dunkleren Erscheinung (siehe Kapitel 4.2) im Rahmen der Messunsicherheit keine wärmere Wirkung im Vergleich zum Referenzbelag AC 11 (CP-11) auf. Die vier durch Kornersatz aufgehellten SDA Beläge zeigen allesamt eine gute kühlende Wirkung, wobei die wassergestrahnten Beläge am besten abschneiden. Diese Resultate lassen darauf schliessen, dass der Ersatz der Kornfraktion mit hellem Gestein grundsätzlich dem Aufheizen der Beläge entgegenwirkt. Durch das Freilegen der hellen Gesteinskörner kommt dieser Effekt zu tragen, entweder bedingt durch Abnutzung über die Zeit oder – noch stärker und unmittelbar – durch eine Oberflächenbehandlung wie Wasserstrahlen oder Schleifen. Allgemein zeigt sich die Temperaturwirkung der SDA Beläge als konstant über den Monitoringzeitraum. Beim Abschnitt CP-8C, der unbehandelten Oberfläche mit Kornersatz hat sich die Temperaturwirkung sogar aufgrund des Freilegens von hellem Gestein durch Verkehrsabrieb anfangs verbessert.
- Die Temperaturwirkungen der einzelnen Beläge sind nachts deutlich schwächer als tagsüber, da hier nicht mehr die direkte Einstrahlung, sondern die Abstrahlung und die umliegend gespeicherte Wärme relevant sind. Bei grossflächigerem Einsatz von kühlen Belägen wären daher die Nacht-Wirkungen vermutlich ausgeprägter (weniger umliegende Wärmespeicherung tagsüber). Momentan ist noch ungeklärt, wieso der geschliffene SDA4-16 Belag (CP-8B) trotz guter Temperaturwirkung während des Tages in der Nacht keine Wirkung mehr aufweist (insbesondere im Vergleich mit den anderen aufgehellten SDA4 Belägen).

4.4 Belagsalbedo

Tabelle 7 zeigt die Albedo-Messwerte des jeweiligen Fahrspur Querprofils und den entsprechenden Durchschnittswert für jeden Belagsabschnitt. Bei der Messung im Querprofil wurden die beiden Radspuren und die Fahrspurmitte erfasst. Die Messunsicherheit wird auf +/- 0.01 geschätzt.

Tabelle 7: Durchschnittliche Albedo-Messwerte der Messjahre 2021 und 2022 inkl. Trend und für 2022 Messwert-Aufschlüsselung nach Position im Querprofil (in oder zwischen Radspur).

Poren	Bauart	Typ	Belagsabschnitt	Technologie	2021, Ø* Albedo [-]	2022, Albedo [-]			Trend '21 zu '22
						in Spur	zw. Spur	Ø*	
dicht	Abstreuerung	SMA 8	CP-5C	700 g/m ² , 5-8 mm, weiss	0.14	0.15	0.14	0.14	→
			CP-5B	1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss	0.14	0.15	0.15	0.15	→
			CP-5A	650 g/m ² , 2-5 mm, weiss	0.13	0.14	0.13	0.14	→
	Farbanstrich	AC 11	CP-2	RAL 7035 lichtgrau	0.23	0.24	0.25	0.24	→
			CP-1	RAL 102 sandgelb	0.26	0.28	0.28	0.28	→
	Standard		CP-11	-	0.13	0.13	0.13	0.13	→
	Farbbelag	AC 8	CP-6	farbloses Bitumen, weisse Pigmente	0.10	0.17	0.17	0.17	↗
offenporig	Kornersatz	SDA 8-12	CP-7	helles Gestein (wassergestrahlt)	0.16	0.24	0.25	0.24	↗
		SDA 4-16	CP-8A	helles Gestein (wassergestrahlt)	0.18	0.23	0.24	0.23	↗
			CP-8B	helles Gestein (geschliffen)	0.23	0.20	0.19	0.20	↘
			CP-8C	helles Gestein (unbehandelt)	0.16	0.18	0.18	0.18	→
	Standard		CP-12	-	0.12	0.11	0.10	0.10	→

*Je dunkler die violette Schattierung, desto tiefer die Albedo und desto „dunkler“ (gesamtes Spektrum) wirkt der Belag

Die gemessene Albedo bewegt sich zwischen 0.28 und 0.10, wobei der Abschnitt mit der höchsten Albedo (am hellsten) der Belag CP-1 (AC-11, Farbanstrich, sandgelb, Jahr 2022) ist und die tiefste Albedo (am dunkelsten) beim SDA4 Referenzbelag und dem Farbbelag (CP-12 und CP-6 in den Jahren 2022 bzw. 2021) ermittelt wurde. Betrachtet man die Variation der Albedo zwischen den Radspuren und Fahrspurmitte, so zeigt sich eine im Rahmen der Messunsicherheit kaum erkennbare Variation. Das heisst, dass, selbst wenn optisch die Radspuren heller bzw. dunkler (je nach Abschnitt und Blickwinkel) wirken, ist dies für die Gesamtstrahlungsbilanz wenig relevant.

Die zwei Standardbeläge CP-11 und CP-12 weisen mit 0.10 bis 0.13 tiefe Albedo-Messwerte auf, ebenso die drei SMA 8 Belagsabschnitte mit Werten von 0.13 und 0.15. Dies bestätigt die Auswirkung des substanziellen Kornverlustes des abgestreuten weissen Splitts ein Jahr nach Belagseinbau.

Die SDA Beläge mit Kornersatz durch helles Gestein weisen deutlich höhere Albedo-Werte auf, wobei die Beläge mit Oberflächenbehandlung zwei Jahre nach Belagseinbau die höchsten Werte aufweisen. Durch die Oberflächenbehandlung wurden die hellen Körner freigelegt und reflektieren dadurch mehr

Strahlung als die Standardoberfläche. Während die wassergestrahlten Beläge die Albedo weiter erhöhen konnten (Verwitterung verbliebender Bitumenreste), sank die Albedo der geschliffenen Fläche (Verschmutzung der anfangs freigelegten Flächen). Die hellsten und somit besten Albedo-Werte wurden bei den zwei Belägen mit Farbanstrich sowie den wassergestrahlten SDA Belägen gemessen.

Der Farbbelag CP-6 hat seine Albedo von dunklen 0.1 im 2021 auf mittlere 0.17 im 2022 verbessert.

Ein Vergleich mit den Albedo-Werten aus dem Messjahr 2020 ist nicht möglich, da 2021 mit der Verwendung des Albedometers eine verbesserte Methodik angewendet wurde.

4.5 Belagsakustik

Die Ergebnisse der CPX-Messungen sind in Abbildung 17 für die SMA- und AC Beläge und in Abbildung 18 für die SDA Beläge dargestellt. Zusätzlich sind die detaillierten, numerischen Werte in Anhang I tabellarisch aufgeführt. Die hier angegebene akustische Belagsgüte bezieht sich auf einen Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil (Schwerverkehrsanteil) und gibt die lärmindernde Wirkung in Dezibel im Vergleich zum neutralen Belag im Strassenlärmmodell StL-86+ an.

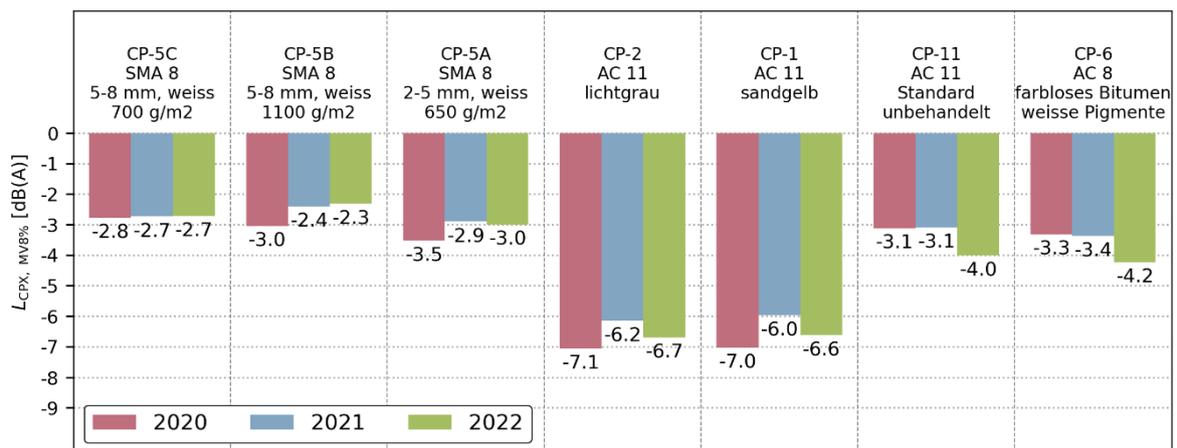


Abbildung 17: Akustische Belagsgüte der SMA- und AC Belagsabschnitte für die drei Messjahre mit Alter 0 bis 2 Jahre. Die akustische Belagsgüte ist als Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil und in Bezug zu StL-86+ angegeben.

Die eingebauten SMA 8 Beläge weisen mit -2.3 bis -3.5 dB für alle drei Messjahre leicht bessere akustische Wirkungen als die entsprechenden Erwartungswerte vergleichbarer Beläge (-1.7 dB) in der Schweiz auf. Trotz Verlust von abgestreutem Splitt sind über die drei Jahre keine ausgeprägten Wirkungsverluste zu verzeichnen.

Die beiden AC 11 Beläge mit den Farbanstrichen weisen ungewöhnlich gute akustische Messwerte auf und zeigen ebenfalls praktisch keinen Wirkungsverlust über die Zeit. Allerdings sind diese Abschnitte effektiv nicht als AC 11 Beläge zu betrachten, da der Farbanstrich eine Oberflächenbeschichtung mit sehr feinem Korn impliziert und somit eine eigene Oberflächentextur erzeugt. Durch diese feine Belagsoberfläche findet eine gute Texturentlüftung im hochfrequenten Bereich (2'000-5'000 Hz) statt. Schallabsorption als Ursache des guten Abschneidens spielt bei diesen zwei akustisch dichten Belägen jedoch keine Rolle.

Der AC 11 Standardbelag (CP-11) sowie der AC 8 Farbbelag (CP-6) liegen in einem für diese Beläge zu erwartenden Wirkungsbereich von rund -3 dB in den Jahren 0 und 1. Bei diesen zwei Belägen ist ein akustischer Wirkungsgewinn von knapp 1 dB nach zwei Jahren feststellbar. Die spektrale Analyse zeigt hierbei, dass vor allem im tieffrequenten Bereich eine Verbesserung stattfand und somit die Oberflächentextur akustisch verbessert wurde. Diese Messresultate passen zur Beobachtung bei der Begehung (keine Belagsschäden wie Kornausbrüche).

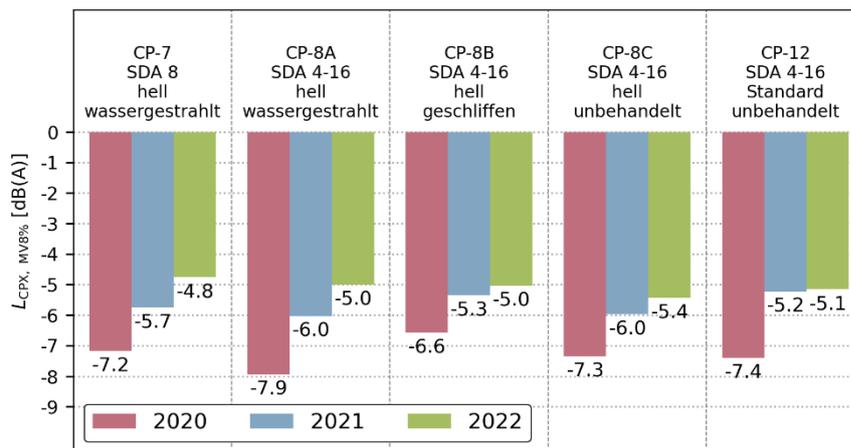


Abbildung 18: Akustische Belagsgüte der SDA Belagsabschnitte für die drei Messjahre mit Alter 0 bis 2 Jahre. Die akustische Belagsgüte ist als Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil und in Bezug zu StL-86+ angegeben.

Die eingebauten SDA Beläge wiesen im Neuzustand (Jahr 2020) sehr gute akustische Wirkungen mit rund -6.6 bis -7.9 dB auf. Damit liegen alle Beläge über den Erwartungswerten, insbesondere der SDA 8-12 Belag liegt mit einem Anfangswert von -7.2 dB ca. 2.5 dB über den Durchschnittswerten eines solchen Belags. Zwei Jahre nach Belagseinbau weisen alle eingebauten SDA Beläge deutlich geringere akustische Wirkungen auf – der Rückgang liegt im Bereich von 1.6 (CP-8B) bis 2.3 dB (CP-12). Dieser Rückgang könnte durch Schmutzeintrag und Porenverstopfung erklärt werden - durch das Verstopfen der sonst offenen Poren nimmt die Schallabsorption deutlich ab. Die absoluten Belagsgütwerte zwei Jahre nach Belagseinbau liegen dennoch innerhalb des zu erwartenden Bereichs für SDA Beläge.

5. Synthese

Mit dem Monitoring der Teststrecke kühle Beläge auf der Neuen Murtenstrasse in Bern in den Sommern 2021 und 2022 wurden die zehn Testbeläge und zwei Standardbeläge umfassend überwacht und untersucht. Hierzu wurden die Belagstemperaturen, die Belagsalbedo sowie die Belagsakustik gemessen und mit einer visuellen Zustandserfassung ergänzt. Zwei Jahre nach Einbau der Testbeläge können damit auch Aussagen zur Temperaturwirkung und der Beständigkeit bzgl. Bautechnik und Akustik gemacht werden. Die Teststrecke, bestehend aus drei SMA-, vier AC- und fünf SDA Belägen unterschiedlicher Bauweise, erlaubt den direkten Vergleich der verschiedenen Aufhellungstechnologien hinsichtlich den oben genannten Bewertungsgrössen:

- Bauweisen und Technologien untereinander: Abstreuerung, Farbanstrich, Farbbelag und Kornersatz; dichte vs. offenporig Bauweise
- SMA Beläge mit Abstreuerung untereinander: Einfluss Splitt-Menge und Splitt-Grösse
- AC Beläge mit Farbanstrich oder Farbbelag untereinander: Einfluss Farbwahl bzw. Bauweise
- SDA Beläge mit Kornersatz untereinander: Einfluss Oberflächenbehandlung und Grösst Korn

Tabelle 8 fasst die zentralen Ergebnisse aus Kapitel 4 zusammen.

Tabelle 8: Übersicht der ermittelten Bewertungs- und Messgrössen für alle Testbeläge im Messjahr 2022 inkl. den Trends 2020-2021 und 2021-2022 (Pfeile): ΔT (Durchschnittliche Wirkung im Zeitraum 12-16 Uhr bezogen auf CP-11, siehe Kapitel 4.3), Albedo (siehe Kapitel 4.4), akustische Belagsgüte (angegeben im Mischverkehr MV8, siehe Kapitel 4.5) und baulicher Zustand (siehe Kapitel 4.2).

Poren	Bauart	Typ	Belagsabschnitt	Technologie	ΔT [K]		Albedo [-]		MV8 [dB]		baulicher Zustand
dicht	Abstreuerung	SMA 8	CP-5C	700 g/m ² , 5-8 mm, weiss	↘↘	1.6	→	0.14	→→	-2.7	↘↘
			CP-5B	1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss	↘↘	1.1	→	0.15	↘→	-2.3	↘↘
			CP-5A	650 g/m ² , 2-5 mm, weiss	↘→	-0.3	→	0.14	↘→	-3.0	↘↘
	Farbanstrich	AC 11	CP-2	RAL 7035 lichtgrau	→→	-3.1	→	0.24	↘→	-6.7	↘→
			CP-1	RAL 102 sandgelb	→↘	-2.6	→	0.28	↘→	-6.6	↘→
	Standard		CP-11	-	Ref	Ref	→	0.13	→↗	-4.0	→→
	Farbbelag	AC 8	CP-6	farbloses Bitumen, weisse Pigmente	→↘	0.4	↗	0.17	→↗	-4.2	→→
offenporig	Kornersatz	SDA 8-12	CP-7	helles Gestein (wassergestrahlt)	→↘	-4.4	↗	0.24	↘↘	-4.8	→→
		SDA 4-16	CP-8A	helles Gestein (wassergestrahlt)	→→	-4.9	↗	0.23	↘↘	-5.0	→→
			CP-8B	helles Gestein (geschliffen)	→→	-3.4	↘	0.20	↘→	-5.0	→→
			CP-8C	helles Gestein (unbehandelt)	↗→	-2.8	→	0.18	↘↘	-5.4	→→
	Standard		CP-12	-	→→	0.4	→	0.10	↘→	-5.1	→→

Bautechnik und aufhellende Technologie

- Die besten Temperaturwirkungen weisen die SDA Beläge mit Kornersatz und AC Beläge mit Farbanstrich auf. Beide Bauweisen unterscheiden sich deutlich: offenporig (lärmarm) vs. dicht (konventionell). Trotzdem (dank der sehr feinen Textur der AC Beläge) weisen diese Beläge alle durchwegs sehr gute akustische Wirkungen auf und zeigen erfreuliche Synergien aus Lärmschutz und verminderter Oberflächentemperaturen. Die Albedowerte der AC Beläge mit Farbanstrich sind die höchsten. Dass die SDA Beläge mit vergleichsweise reduzierter Albedo dennoch überlegene Temperaturwirkung aufweisen, zeigt den weiteren Einfluss von Bauart (offenporig) und Oberflächenbehandlung. Bezüglich dem baulichen Zustand zeigen sich bei den AC Belägen mit Farbanstrich Schwächen in der Beständigkeit, im Gegensatz zu den SDA Belägen, welche allesamt in gutem Zustand sind.
- Der auf die SMA 8 Beläge abgestreute weisse Splitt zeigte keine Beständigkeit und wurde zu grossem Teil auf allen Testbelägen abgetragen. Dies führt zu einer etwas reduzierten akustische Wirkung und einem Verschwinden der kühlenden Wirkung, was sich auch in der Albedo und dem baulichen Zustand zeigt. Eine Analyse der Auswirkung verschiedener Abstreumengen und -grössen ist damit obsolet. Künftige Versuche mit aufgehelltem konventionellen Walzasphalt sollten eine bessere Einbindung in den Belag erzielen, z. B. durch den Kornersatz mit hellem Gestein im Mischgut.
- Der mit transparentem Bitumen und Farbpigmenten produzierte AC 8 Farbbelag weist zwei Jahre nach Belagseinbau keine Temperaturwirkung mehr auf. Die beobachtete dunkle Färbung der Radspuren durch Pigmentabtrag verstärkt die mangelhafte Bewertung dieses Testbelags. Es zeigt sich, dass diese Technologie nur bei ganz neuen Belägen wirksam ist.

AC Beläge: Einfluss Farbwahl

- Die Farbe «sandgelb» wies im Jahr 2021 mit -4.7 K Temperaturwirkung tagsüber (12-16 Uhr) eine höhere Wirkung und auch höhere Albedo auf als die Farbe «lichtgrau». Jedoch reduzierte sich diese Temperaturwirkung bereits nach einem weiteren Jahr und glich sich untereinander an.
- Ausser der homogenen Alterung der Farbschicht, wurde im Gegensatz zur Farbe «lichtgrau» keine Fleckenbildung bei der Farbe «sandgelb» beobachtet.

SDA Beläge: Einfluss Oberflächenbehandlung und Grösstkorn

- Generell erweist sich der Kornersatz mit hellem Gestein als robuste und effektive Methode um kühlere Oberflächentemperaturen zu ermöglichen. Auch sind alle SDA Beläge in einem guten baulichen Zustand.
- Entscheidend für die weitere Ausprägung des kühlenden Effekts ist die Oberflächenbehandlung, welche unmittelbar zu einer höheren Albedo und auch höheren Temperaturwirkung führt. Durch die Oberflächenbehandlung «Wasserstrahlen» können auch helle Bereiche freigelegt werden, die nicht direkt durch Abrieb oder Schleifen erreichbar sind.
- Im Rahmen der Messunsicherheit zeigt die Oberflächenbehandlung grösseren Einfluss auf die Temperaturwirkung als das Grösstkorn (SDA 4 vs. SDA 8), auch wenn ein Einfluss der spezifischen Oberfläche vermutet wird.
- Die oberflächenbehandelten SDA Beläge können zwei Jahre nach Einbau klar als «Testsieger» gewertet werden: die wassergestrahlten SDA 4 und SDA 8 Beläge haben eine um ca. 4.5 K reduzierte mittlere Temperatur im Zeitraum 12 bis 16 Uhr, eine akustische Belagsgüte um ca. -5 dB und eine intakte Textur. Dies belegt die mögliche und bisher beständige Synergie von Lärm- und Hitzeschutz.

6. Ausblick

Anschliessend an die Pilotmessungen 2020 konnten zwei Sommer lang weitere Monitoring-Daten erhoben werden, welche erlauben, Abschätzungen zur Beständigkeit der Testbeläge hinsichtlich Temperaturwirkung, Akustik und Bautechnik zu treffen. Es zeigt sich deutlich die Problematik des Verlustes von Abstreusplitt auf den SMA 8 Belägen und die gute Beständigkeit und mögliche Synergie von Lärm- und Temperaturminderung auf den SDA Belägen mit Kornersatz und Oberflächenbehandlung.

Wegen der prinzipiell hohen Attraktivität der Abstreuerung mit hellem Gestein als einfache, kostengünstige Lösung wären weitere Entwicklungen und erneute Tests zur Optimierung der Haftung des Abstreusplitts am Belag interessant.

Andere zur Erprobung empfohlene Technologien wären konventionelle Beläge mit verbesserter Einbindung von hellem Gestein, z.B. durch Kornersatz. Auch könnte beim Einsatz in Bereichen mit weniger hohen Ansprüchen an die Polierresistenz – z. B. Parkplätze oder Trottoirs – hierfür lokales helles Gestein verwendet werden, um Kosten zu senken und die Ökobilanz zu verbessern.

In dieser Pilotstudie wurden zwei unterschiedliche Oberflächenbehandlungen angewendet: das Abschleifen und das Wasserstrahlen der Oberfläche. Das Wasserstrahlen könnte durch ein Ausmagern der Oberfläche eine möglicherweise reduzierte bautechnische Beständigkeit zur Folge haben. Eine niedrige Beständigkeit der wassergeschliffenen Beläge wurden bisher jedoch nicht beobachtet, dies sollte aber weiter verfolgt werden.

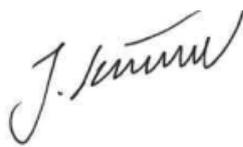
Das hier verwendete Gestein wurde wegen den hohen Qualitätsanforderungen aus dem Ausland importiert und eignet sich damit nicht für den grossflächigen Einsatz. Es sollte somit zukünftig untersucht werden, welches helle Gestein lokal verfügbar ist und ob dies die Qualitätsanforderungen im Strassenbau erfüllen kann.

Die hier ausgewiesenen Temperaturwirkungen gelten nur mit zeitlich- und räumlicher Begrenzung. Den Effekt einer grossflächigen Anwendung von kühlen Belägen im urbanen Raum und dessen Auswirkungen auf die Luft- und Umgebungstemperaturen sind zurzeit noch unklar. Es besteht somit weiterer Forschungsbedarf in der grossflächigen Anwendung von kühlen Belägen wie auch in der Temperatur-Modellierung von ganzen Strassenzügen oder Quartieren.

Grolimund + Partner AG



Erik Bühlmann



Johannes Schindler



Daniel Schweizer

Anhang

I CPX Messergebnisse

Tabelle 9: CPX Messergebnisse je Belagsabschnitt für die drei Messjahre 2020, 2021 und 2022. Alle Angaben in Dezibel und in Bezug auf den neutralen Belag im Strassenlärmmodell StL-86+. STLN1 („N1“) und STLN2 („N2“) sind direkte, temperaturkorrigierte Ergebnisse aus der Messfahrt mit PW- bzw. LKW-Referenzpneu, MV8 ist der daraus abgeleitete Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil.

Poren	Bauart	Typ	Belagsabschnitt	Technologie	2020 StL86+ [dB]			2021 StL86+ [dB]			2022 StL86+ [dB]		
					N1	N2	MV8	N1	N2	MV8	N1	N2	MV8
dicht	Abstreuerung	SMA 8	CP-5A	650 g/m ² , 2-8 mm, weiss	-2.0	-5.2	-3.5	-1.1	-5.1	-2.9	-1.2	-4.5	-2.7
			CP-5B	1100 g/m ² , 5-8 mm, weiss	-1.4	-5.1	-3.0	-0.6	-4.8	-2.4	-0.8	-4.1	-2.3
			CP-5C	700 g/m ² , 5-8 mm, weiss	-1.3	-4.5	-2.8	-1.0	-4.9	-2.7	-1.6	-4.6	-3.0
	Farbanstrich	AC 11	CP-1	RAL 102 sandgelb	-5.8	-8.4	-7.0	-4.7	-7.4	-6.0	-6.0	-7.4	-6.7
			CP-2	RAL 7035 lichtgrau	-5.9	-8.3	-7.1	-4.9	-7.5	-6.2	-5.7	-7.6	-6.6
	Standard		CP-11	-	-1.9	-4.3	-3.1	-1.9	-4.4	-3.1	-2.9	-5.1	-4.0
	Farbbelag	AC 8	CP-6	farbloses Bitumen, weisse Pigmente	-2.3	-4.3	-3.3	-2.1	-4.7	-3.4	-3.4	-5.0	-4.2
offenporig	Kornersatz	SDA 8-12	CP-7	helles Gestein (wassergestrahlt)	-5.3	-9.5	-7.2	-4.0	-7.9	-5.7	-3.4	-6.3	-4.8
		SDA 4-16	CP-8A	helles Gestein (wassergestrahlt)	-6.3	-9.9	-7.9	-4.5	-7.9	-6.0	-3.6	-6.6	-5.0
			CP-8B	helles Gestein (geschliffen)	-5.3	-8.0	-6.6	-4.0	-6.9	-5.3	-4.0	-6.0	-5.0
			CP-8C	helles Gestein (unbehandelt)	-5.9	-9.0	-7.3	-4.5	-7.7	-6.0	-4.1	-6.8	-5.4
			Standard	CP-12	-	-5.8	-9.3	-7.4	-4.0	-6.6	-5.2	-3.9	-6.5

II Photos Belagsabschnitte

Alle Photos wurden am 7. September 2021 von Tobias Balmer, Weibel AG aufgenommen. Der Belagsabschnitt ist jeweils rot umrandet.

CP-5C (SMA 8, 5-8 mm, weiss, 700 g/m²)



CP-5B (SMA 8, 5-8 mm, weiss, 1100 g/m²)



CP-5A (SMA 8, 2-5 mm, weiss, 650 g/m²)



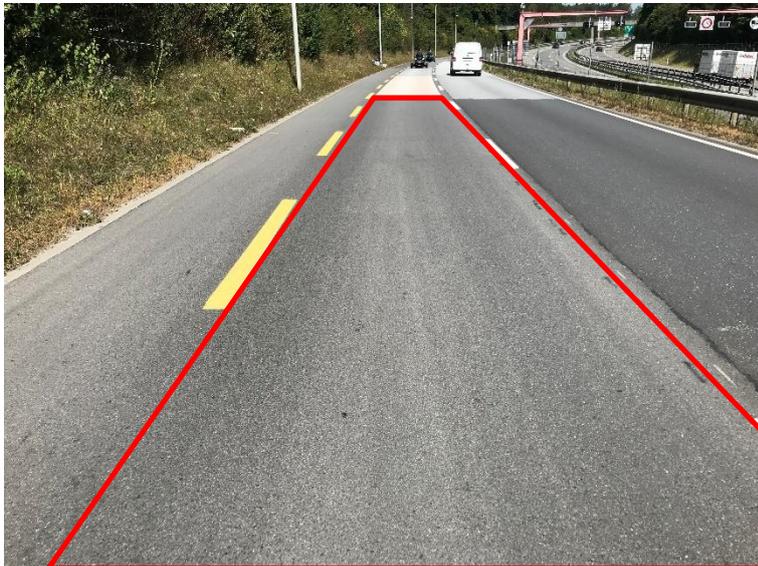
CP-1 (AC-11, lichtgrau)



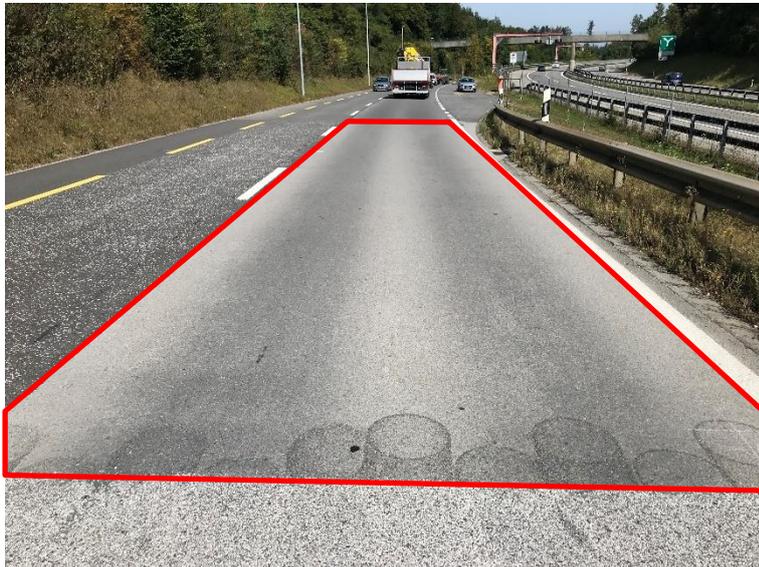
CP-2 (AC 11, sandgelb)



CP-11 (AC 11, Standard)



CP-6 (AC 8, farbloses Bitumen mit weissen Pigmenten)



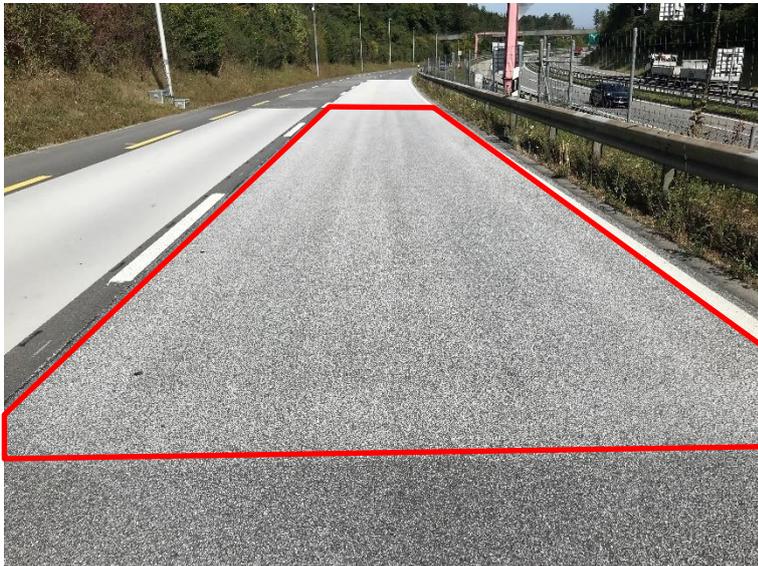
CP-7 (SDA 8-12, hell, wassergestrahlt)



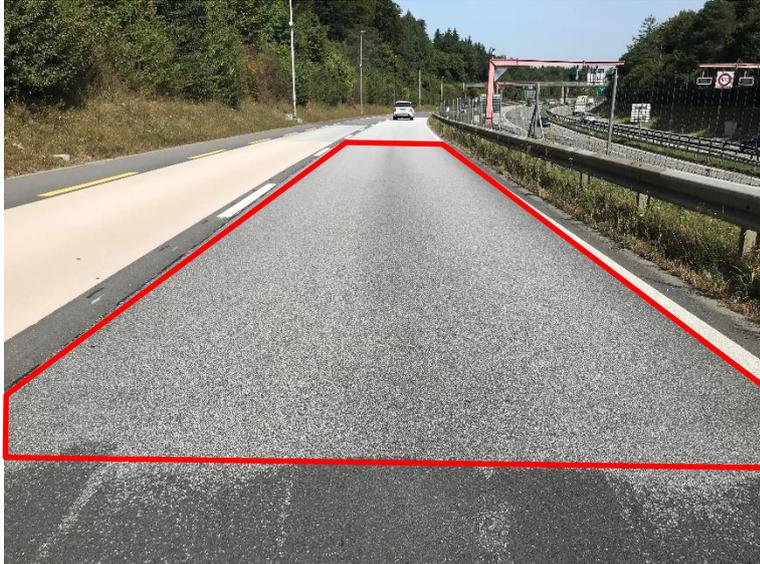
CP-8A (SDA 4-16, hell, wassergestrahlt)



CP-8B (SDA 4-16, hell, geschliffen)



CP-8C (SDA 4-16, hell, unbehandelt)



CP-12 (SDA 4-16, Standard)

